

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0452

燃爆抑制粉体及其抑制机理研究进展*

周永浩^{1,2}, 杨哲^{1,2}, 刘欢^{1,2}, 郑金磊^{1,2}, 喻萍^{1,2}, 王浩喆^{1,2}, 党文义^{1,2}, 于安峰^{1,2}

1. 化学品安全全国重点实验室, 山东 青岛 266104;
2. 中石化安全工程研究院有限公司, 山东 青岛 266104)

摘要: 燃爆抑制技术可有效减轻事故后果, 是可燃气体燃爆安全防护技术的重要环节。作为抑爆装置的核心组成, 抑制剂的性能可直接影响抑制系统的可靠性。本文聚焦燃爆抑制领域的研究成果, 对粉体抑制剂及其抑制机理进行了系统的总结和分析。基于组成方式不同, 将抑制粉体分为单组分和复配粉体, 其中单组分抑制粉体又可根据抑制机理的差异, 分为活性粉体和惰性粉体。在文献综述部分, 按照“粉体材料总体介绍-相关实验和理论研究-抑制机理归纳总结”的结构顺序进行评述。对现有研究存在的问题进行总结并对未来研究进行展望, 提出对抑制性能测试过程进行规范化和标准化, 强调通过化学反应动力学模拟指导材料合成, 提高材料筛选效率, 减少研究的盲目性。

关键词: 燃爆抑制; 可燃气体; 粉体材料; 抑制机理

中图分类号: O389; X932 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Research progress on explosion-suppressing powders and suppressing mechanisms

ZHOU Yonghao^{1,2}, YANG Zhe^{1,2}, LIU Huan^{1,2}, ZHENG Jinlei^{1,2}, YU Ping^{1,2},
WANG Haozhe^{1,2}, DANG Wenyi^{1,2}, YU Anfeng^{1,2}

1. State Key Laboratory of Chemical Safety, Qingdao 266104, Shandong, China;
2. SINOPEC Research Institute of Safety Engineering Co., Ltd., Qingdao 266104, Shandong, China)

Abstract: The leakage of combustible gas could lead to serious explosion accidents, which could cause great damage to people's lives and property. Explosion suppression technology can effectively reduce the consequences of the explosion accidents, which is an important part of combustible gas explosion safety protection technology. As the core component of explosion suppression device, the performance of the explosion suppressant can directly affect the reliability of explosion suppression system. The research results in the field of explosion suppression at home and abroad are focused on, and the explosion suppression powder and its inhibition mechanism are systematically summarized and analyzed. Based on the different compositions, the explosion suppressing powder is divided into one-component and compound materials. According to the difference of the suppressing mechanism, the one-component suppressing powder is divided into active powder and inert powder. Due to the synergetic effects of different substances, the development of the compound material is the research hotspot. In the literature review part, this paper follows the structure "General introduction of powder materials—Related experimental and theoretical research—Suppression mechanism summary". The first part provides the general introduction of the material, including the origin, structure and property. The second part offers the summary of the related research result about the material. The third part focuses on the physical and chemical suppression mechanism of different material, which contributes to the deeper understanding of the suppression effect. Finally, the existing problems of the research at present is

* 收稿日期: 2024-11-18; 修回日期: 2025-06-07

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0199100); 国家自然科学基金(52404272)

第一作者: 周永浩(1995—), 男, 博士, 工程师, zhouyh.qday@sinopec.com

通信作者: 于安峰(1982—), 男, 博士, 教授级高工, yuaf.qday@sinopec.com

summarized and the development of the future research work is discussed. In addition, this article proposes to standardize the testing process, emphasizes the use of numerical simulation to guide the suppressing of material synthesis and reduce the blindness of research. The aim of this review is to provide scientific understanding and technical support for the development of high-efficiency explosion suppression technology.

Keywords: combustion and explosion suppression; combustible gas; powder material; suppression mechanism

随着社会的进步和生产力的不断发展,以瓦斯、液化石油气、天然气和氢气为代表的可燃气体引发的火灾、爆炸事故频繁发生。近年来部分气体爆炸事故见表 1,上述事故的发生严重威胁人民生命和财产安全,也阻碍氢气等新型清洁燃气能源的推广使用。因此,急需开发、优化相应的安全防护技术,预防事故发生,减弱事故危害。

表 1 近年来部分燃气爆炸事故

Table 1 Some gas explosion accidents in recent years

时间	地点	原因	后果
2017.06.05	山东省临沂市	企业安全意识淡薄导致金誉石化中的一辆石油液化气罐车发生泄漏爆炸事故	10人死亡,9人受伤
2019.05.23	韩国江原道江陵市	因人为操作不当,导致储氢罐内发生氢氧混合而诱发爆炸	2人死亡,6人受伤
2021.06.13	湖北省十堰市	管道破裂导致天然气大量泄漏,引发爆炸事故	25人死亡,138人受伤
2023.08.21	陕西省延安市	人为操作不合规,导致瓦斯爆炸事故	11人死亡,11人受伤
2024.03.11	安徽省谢桥煤矿	防范措施不到位,引发瓦斯爆炸事故	9人死亡,15人受伤
2024.03.13	河北省廊坊三河市	天然气管道泄漏,导致爆炸事故	7人死亡,27人受伤

燃爆安全防护是抑爆、泄爆、抗爆和隔爆等多个措施的联动配合,其中燃爆抑制技术通过物理或化学作用,阻止火焰快速发展,可实现爆炸压力的显著降低,是安全防护技术的前置内容。抑制剂是抑制装置的核心组成,其性能的优劣直接影响抑制系统的可靠性。基于材料相态的不同,抑制剂可分为气体类、液体类和固体类。现阶段,由于粉体抑制材料具有高效、经济、环保、性能稳定和使用寿命长的特性,在消防领域得到了广泛的发展和应用,目前市面上已存在较成熟的产品,如超细 ABC 干粉、超细 BC 干粉等,可快速扑灭火焰,减小火灾事故带来的严重后果。然而,对于爆炸过程,火焰的传播速度较快,反应过程瞬间完成,常规干粉灭火剂难以快速热解,导致抑制性能偏低的问题。针对上述问题,学术界和产业界开展了大量实验和理论研究,以期形成可高效抑制燃气爆炸的新型抑制粉体。然而,现阶段的研究在取得显著进展的同时,也存在一定的盲目性。此外,对于氢气、乙烯等高活性气体,现有粉剂想要实现高效抑制,难度依然很大。对于燃爆抑制粉体及其抑制机理进行系统性的分类和总结,需要说明的是,本文中主要针对可燃气体燃爆抑制的相关研究,在文献评述过程中对可燃粉尘以及阻燃领域的研究进行部分引用,为后续材料合成以及机理研究提供延伸参考。

1 单组分抑制粉剂

基于粉体燃爆抑制机理的不同,单组分抑制粉剂可分为活性粉体抑制剂(NaHCO_3 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 等)和惰性粉体抑制剂(SiO_2 、 CaCO_3 等)^[1]。活性粉体抑制剂主要表现为淬灭自由基等化学作用,惰性粉体抑制剂主要表现为热解吸热等物理作用。

1.1 活性粉体抑制剂

1.1.1 碳酸氢盐

现阶段,碳酸氢盐类抑制粉体主要包括 NaHCO_3 和 KHCO_3 ,其中, NaHCO_3 为 BC 类干粉灭火器中的主要活性成分,具有良好的灭火性能^[2],较细的 NaHCO_3 粉体比 Halon 1301 灭火性能提高了 2~4 倍。由于拥有丰富的钾矿资源,美国、加拿大等北美国家主要采用 KHCO_3 作为抑制粉体的主要成分,通过细化

和改性, 研制出了 PKP 灭火干粉, 这是一种具有极快灭火速度的紫色超细粉体^[3]。

针对碳酸氢盐的灭火抑制特性, 学者们基于容积 20 L 的球形容器等实验装置, 探究了粉体粒径、浓度等参数对其抑制性能的影响。对于 NaHCO_3 , Iya 等^[4]证实了含钠盐热解产生的 $\text{Na}\cdot$ 浓度与火焰抑制效果具有良好的相关性, 并且认为 $\text{Na}\cdot$ 等是在气相形态下参与反应, 发挥抑制作用。郑立刚等^[2]和 Zheng 等^[5]研究了容积 5 L 的垂直管道内 NaHCO_3 的粒径分布、粉体浓度对瓦斯爆炸的抑制效果, 通过调整不同粒径粉体所占的比例, 制备了平均粒径相同、粒径分布不同的 NaHCO_3 粉体, 当平均粒径相同时, 粒径分布较广、含有更小粒径的粉体对火焰的抑制效果较好, 在火焰传播的中后期, 大粒径颗粒沉降会造成空间粉剂浓度不均, 影响整体抑制效果; 随着粉体浓度的升高, 爆炸压力峰值逐渐下降。王信群等^[6]采用机械粉碎的方法对 BC 干粉进行了细化和改性, 研究了容积 200 L 的密闭装置内改性 BC 干粉对甲烷爆炸的抑制效果, 发现: 表面形状不规则、粒径呈正态分布的 BC 粉体抑制效果更好, 当粒径达到 $10\ \mu\text{m}$ 时, 粉体颗粒比表面积较大, 抑制性能相比常规粉剂可提高 8~10 倍。付元鹏和余明高等研究了不同浓度的 NaHCO_3 粉体对甲烷爆炸导管泄放过程的影响, 发现: NaHCO_3 粉体的加入可以有效抑制导管内的二次爆炸, 并可在适当浓度下完全消除二次爆炸^[7]; 随着粉体浓度的提高, 超压峰值先下降后升高, 最终趋于稳定, 表明存在最佳的粉体抑制浓度^[8], 这是由于较高浓度的粉体具有较大的热阻, 热量难以扩散, 阻碍了粉尘颗粒的热解作用。Luo 等^[9]研究了 BC 粉体对掺氢甲烷燃爆的抑制性能, 发现: BC 粉体在低掺氢比工况下具有较好的抑制效果; 当掺氢比高于 80% 时, BC 粉体的抑制效果显著减弱, 甚至会产生促进爆炸的作用。随着初始压力和掺氢比的升高, NaHCO_3 的抑制效果逐渐减弱; 掺氢比较高时, 粉体热解速度难以匹配混合气体较快的燃烧速度, NaHCO_3 的抑制机理由物理抑制转变为化学抑制^[10]。

对于 KHCO_3 , Jia 等^[11]的实验结果表明: 随着喷粉压力的提高, KHCO_3 对甲烷燃爆的抑制效果逐渐增强, 超过 0.2 MPa 后, 增强作用减弱; 粒径在 $50\sim 75\ \mu\text{m}$ 范围内, 抑制效果最好, 然而文中未涉及粒径更细的工况。Kuang 等^[12]对比了超细 KHCO_3 粉体和商用 BC 粉体的灭火效果, 发现: 经过表面改性且含有添加剂的超细 KHCO_3 粉体表现出更优良的灭火性能。金属基团可与反应的关键自由基结合, 削弱链式反应, 而由于 $\text{K}\cdot$ 与 $\text{OH}\cdot$ 自由基的结合速率比 $\text{Na}\cdot$ 快 30%, $\text{K}\cdot$ 与 O_2 的结合速率比 $\text{Na}\cdot$ 快 2 倍, 使得 KHCO_3 的抑制效能优于 NaHCO_3 的^[1, 13-14], 这在掺氢甲烷的抑制实验中得到了验证^[15]。

在理论及数值模拟方面, Mitani^[16]和 Chelliah 等^[17]研究结果表明, 粉体颗粒受热分解产生的固相和气相物质可进一步吸热分解或直接参与链式反应。Rosser 等^[18]将 NaHCO_3 的抑制机理分为两部分: (1) NaHCO_3 的热分解; (2) 气相产物与火焰的相互作用, 如图 1 所示。Dounia 等^[19]对 NaHCO_3 颗粒经过火焰面的过程进行了模拟研究, 提出了简化的 NaHCO_3 颗粒热解模型, 模型表明 NaHCO_3 热解产生的气

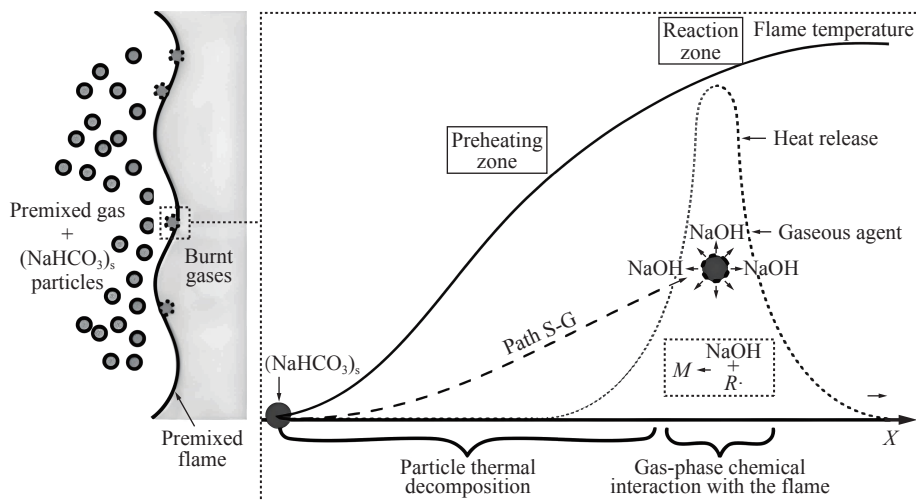


图 1 NaHCO_3 对火焰的抑制机理^[18]

Fig. 1 Suppression mechanism of NaHCO_3 on flame^[18]

相 NaOH 可以有效消除链式反应的自由基, 进而对甲烷爆炸产生抑制作用。Fan 等^[20] 通过数值模拟发现: 随着热解产生 NaOH 体积分数的逐渐升高, 活性自由基 H· 和 OH· 的浓度逐渐下降并趋于平缓, 如图 2 所示, 这表明化学抑制作用存在饱和现象; 当粉体粒径较大时, 物理抑制作用占主导地位, 当粉体粒径较小时, 化学抑制作用占主导地位。

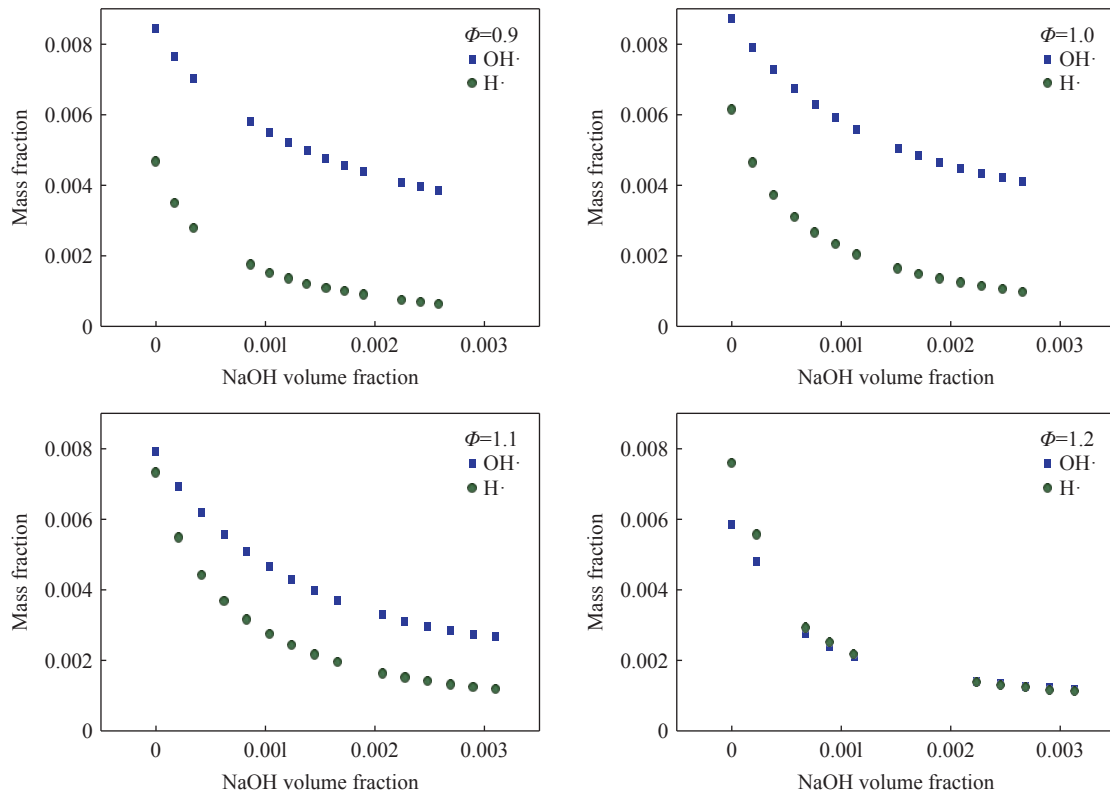


图 2 不同空燃当量比 ϕ 下 NaOH 体积分数对 H· 和 OH· 自由基质量分数的影响^[20]

Fig. 2 Effect of NaOH volume fraction on H· and OH· free radical concentration at different air-fuel equivalence ratios ϕ ^[20]

碳酸氢盐通过物理与化学的协同作用, 表现出良好的抑制性能, 以 KHCO_3 为例, 碳酸氢盐的抑制机理总结如下。

(1) 物理抑制作用

KHCO_3 粉体与火焰接触后, 受热分解为 K_2CO_3 、 CO_2 和 H_2O , 即:



随着温度的进一步升高, K_2CO_3 进一步受热分解为 K_2O 和 CO_2 , 即:



上述热分解反应大量吸收反应热, 抑制反应系统温度的升高^[12]。

此外, 热分解产生的 CO_2 和水蒸气可有效降低反应组分和活性基团的浓度, 阻碍系统温度的快速升高, 减缓基元反应的进行速度, 实现对火焰发展的抑制^[21]。

(2) 化学抑制作用

对于氢气、烷烃类等可燃气体, H·、OH· 自由基是链式反应的主要活性自由基。反应 (2) 中产生的 K_2O 可与中间产物反应生成 KOH, KOH 可通过参与气态均相反应, 捕获链式反应自由基:



上述反应的生成物 $\text{KO}\cdot$ 和 $\text{K}\cdot$ 可以进一步消耗自由基, 生成 KOH , 从而形成自由基消耗的良好循环, 抑制或中断链式反应的进行, 达到燃爆抑制的目的^[22-24]。

1.1.2 磷酸氢盐

与碳酸氢盐的作用机理相似, 磷酸氢盐也可通过分解吸热和捕获自由基的方式抑制火焰的发展。其中, 最有代表性的物质为 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 其为白色结晶粉体, 常用作木材、织物、纸张的防火剂, 现为市面上常用的 ABC 干粉灭火剂的主要活性成分, 属氮-磷系抑制剂。

罗振敏等^[25] 假设 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 完全热分解, 在容积 20 L 的近球形爆炸容器内研究了热分解产物 NH_3 和 P_2O_5 对甲烷爆炸的影响, 实验结果如图 3 所示, 结果表明: NH_3 和 P_2O_5 对于甲烷爆炸均有一定的抑制作用, NH_3 的抑制作用更显著, 这是由于 NH_3 及其相关产物可更有效地与反应自由基结合。戴晓静^[26] 研究了容积 20 L 的爆炸球中多种磷酸二氢盐对瓦斯-煤尘混合物爆炸的抑制作用, 基于对压力峰值和最大升压速率的分析, 发现 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 由于分解产生大量的 NH_3 , 使得其抑制效果优于 KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 。李睿德等^[27] 研究了喷粉压力对 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分散状况及抑制性能的影响, 发现在容积 60 L 的定容燃烧弹中, 0.8 MPa 的喷粉压力能产生较优异的分散性能及抑制效果。基于纹影法, 徐景德等^[28] 研究了 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对甲烷爆炸火焰结构的影响, 发现随着 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 浓度的提高, 分解产生的 NH_3 和含磷物质使得火焰传播速度显著下降, 火焰半径逐渐减小。文虎等研究了容积 20 L 的近球形实验装置内含有 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 的磷酸铵盐对瓦斯爆炸的影响, 发现: 粉体粒径为 22 μm 时, 粉体的最佳抑制浓度为 50 g/m^3 ^[29]; 随着点火时间的延长, 粉体逐渐沉降, 抑制效果逐渐减弱^[30]。张宇明等^[31-32] 对比了超细 ABC 干粉与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 含量不同的普通 ABC 干粉对液化石油气爆炸的影响, 发现: 粒径大小显著影响粉体的热解速率, 对抑制效果的影响相比 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 含量更显著。Zhao 等^[33] 基于实验结果的分析, 发现 ABC 粉剂的加入可以提高煤尘热解的初始温度, 从而显著降低热分解速率, 削减热量释放, 并提出了 ABC 粉剂对甲烷/煤尘复合体系燃爆的抑制机理, 如图 4 所示。Kordylewski 等^[34] 研究发现: 对于生物质粉尘燃爆, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的抑制效果优于 NaHCO_3 。

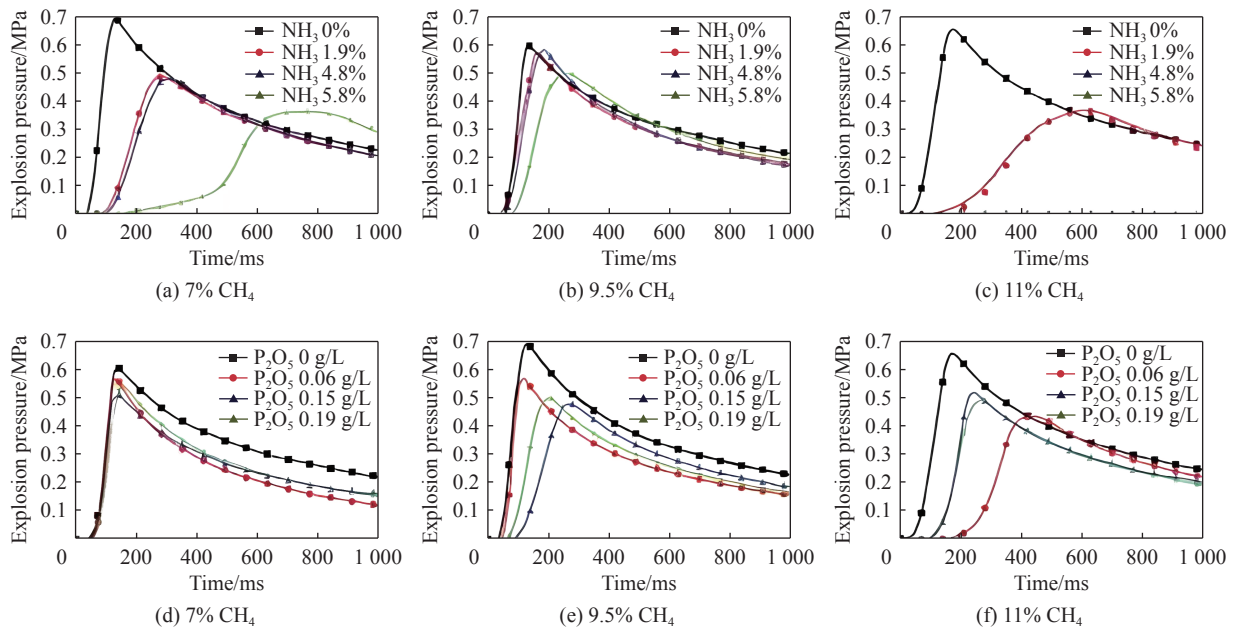


图 3 NH_3 和 P_2O_5 对甲烷爆炸压力的影响^[25]

Fig. 3 Effect of NH_3 and P_2O_5 on methane explosion pressure^[25]

基于 Gaussian 09 等计算软件, 罗振敏等^[35] 运用密度泛函理论 (density functional theory, DFT) 探究了 NH_3 对 CH_4 爆炸的链式反应:

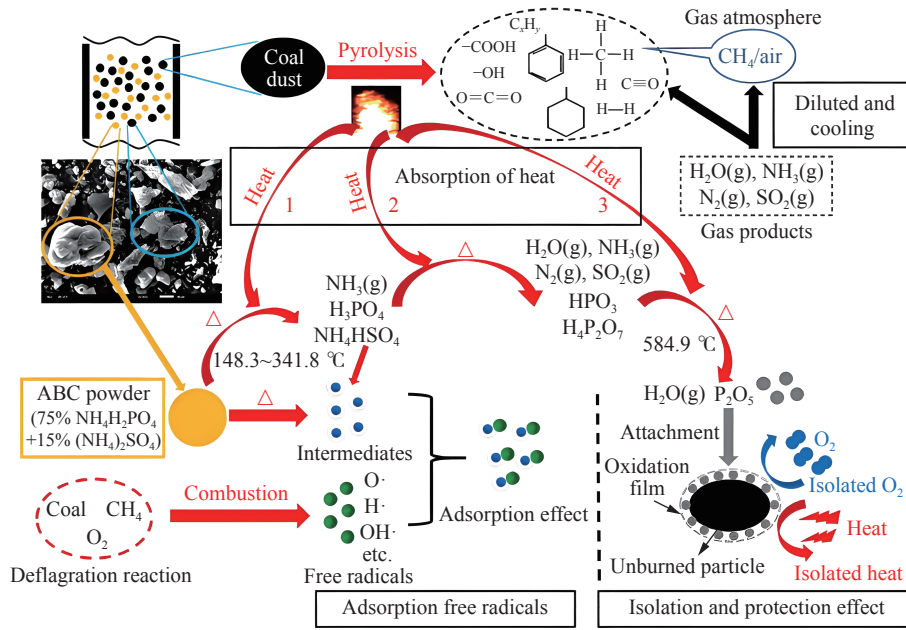


图 4 ABC 粉剂对甲烷/煤尘复合体系燃爆的抑制机理^[33]

Fig. 4 Suppression mechanism of ABC powder on methane/coal hybrid explosion^[33]



的影响机制, 结果表明: 反应 (8) 的正反应活化能高于反应 (5) 的, NH_3 可以取代或者先与 CH_4 和 $\text{H}\cdot$ 自由基反应, 生成 $\text{NH}_2\cdot$ 和 H_2 ; 反应 (9) 的正反应活化能高于反应 (6) 的, NH_3 可以取代 CH_4 与 $\text{OH}\cdot$ 自由基反应, 生成 $\text{NH}_2\cdot$ 和 H_2O ; 反应 (10) 的正反应活化能高于反应 (7) 的, $\text{NH}_2\cdot$ 可以取代 $\text{CH}_3\cdot$ 与 O_2 结合, 生成 NHO 。

磷酸氢盐与火焰接触后表现为物理和化学的双重抑制作用^[36-37], 以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ^[26, 38] 为例, 其抑制机理总结如下。

(1) 物理抑制作用

1) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 受热可快速分解, 释放出 NH_3 和 H_3PO_4 , H_3PO_4 可继续发生分解, 生成 $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 和 $\text{H}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 可继续分解, 最终生成 P_2O_5 和 H_2O , 即:



上述分解反应吸收大量反应热, 降低燃烧反应速率^[39]。

2) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解生成的 P_2O_5 等惰性氧化物, 可对热辐射、热传导过程产生阻隔作用, 阻止火焰的

快速发展和传播。

3) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解产生的大量水蒸气和 NH_3 等气体,在一定程度上促使局部氧浓度下降,降低燃烧反应速率,从而抑制燃烧反应进行,造成火焰因缺氧而熄灭。

(2) 化学抑制作用

1) 由于 N、P 等原子外层电子数与甲烷爆炸链式反应过程中产生的 $\text{HCO}\cdot$ 、 $\text{CH}\cdot$ 和 $\text{HO}_2\cdot$ 等关键自由基相同,因此, N、P 等自由基可取代 $\text{CH}\cdot$ 、 $\text{HCO}\cdot$ 等自由基,参与链式反应。此外, N、P 还可与反应产生的 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{H}\cdot$ 和 $\text{O}\cdot$ 等自由基结合,降低反应自由基浓度,中断链式反应,抑制爆炸的发展,即:



2) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解以及反应 (11) 中产生的 NH_3 可以捕获 $\text{H}\cdot$ 和 $\text{OH}\cdot$ 等关键自由基,减缓反应进行,如反应式 (5)~(7) 所示。

3) 粉体颗粒与反应活化分子碰撞产生动量与热量的交换,使得活化分子转变为稳定分子,从而减少活化分子数量,中断链式反应。

4) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解产生的 H_2O 可使反应体系中 H_2O 的初始浓度升高,使得基元反应逆向进行,一定量的 $\text{H}\cdot$ 自由基变成高能物质 H_2 ,造成甲烷氧化放热不完全^[40]。

1.1.3 金属氢氧化物

以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 为代表的金属氢氧化物具有热稳定性好、不挥发、阻燃效果持久、无毒、不产生二次污染、价格低廉等优点,被广泛用于无机阻燃剂^[41]。近年来,爆炸事故频发,金属氢氧化物开始被应用于抑爆领域。文虎等^[42]通过实验研究发现,随着 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粒径的逐渐减小,其抑爆效果逐渐增强,甲烷浓度不同时, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的抑爆效果不同。王秋红^[43]对比了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 对瓦斯爆炸的抑制作用,发现 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的抑制效果优于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,原因是: $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的吸热量高于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$; $\text{Al}(\text{OH})_3$ 受热分解的脱水量高于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,使得瓦斯浓度降低; $\text{Al}(\text{OH})_3$ 可反应生成活性较低的无机自由基,不足以引发链式反应。对于煤粉、铝镁合金等粉尘爆炸, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 脱水后可形成 Al_2O_3 保护膜,可作为氧屏蔽层,并减弱反应区与燃烧区之间的热传递^[44], $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 抑制煤粉爆炸的机理如图 5^[41]所示。基于

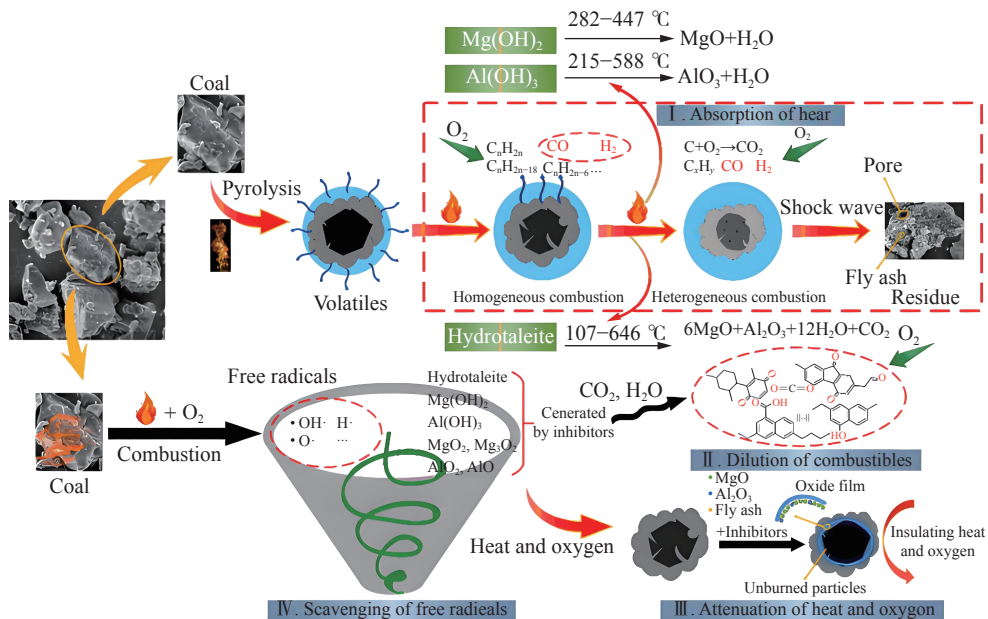


图 5 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 抑制煤粉爆炸的机理^[41]

Fig. 5 Mechanism of $\text{Al}(\text{OH})_3$ and $\text{Mg}(\text{OH})_2$ suppressing coal powder explosion^[41]

对火焰结构、爆炸压力和火焰传播速度的分析, 苏洋^[45]发现 $Mg(OH)_2$ 对甲烷爆炸的最佳抑爆粉剂质量浓度为 0.24 g/L, 而当掺氢甲烷中氢气体积分数超过 80% 后, 粉体颗粒的热解速率相对较慢, $Mg(OH)_2$ 没有产生明显的抑制效果。

以 $Al(OH)_3$ 为例, 金属氢氧化物粉体的阻燃抑爆机理体现为物理和化学 2 个方面。

(1) 物理抑制作用

1) 分解吸热: $Al(OH)_3$ 可受热分解, 生成 Al_2O_3 和 H_2O 。反应式为:



热分解以及水汽化过程中可吸收大量反应热, 降低反应温度, 减缓链式反应进行^[43]。

2) 稀释冷却: $Al(OH)_3$ 脱水形成的水蒸气可降低燃气和氧气的浓度, 减慢燃烧速度或者阻止燃烧反应的持续进行。

(2) 化学抑制作用

1) $Al(OH)_3$ 脱水可形成具有 Lewis 酸碱中心的活性 Al_2O_3 , 促进脱氢反应, 生成保护性碳层。同时, $Al(OH)_3$ 也能够催化碳的沉积及相应碳的氧化反应^[43]。

2) $Al(OH)_3$ 可作为电子来源, 将活性自由基转变为反应活性较低的无机自由基, 从而阻碍链式反应的进行。

1.1.4 聚磷酸铵和三聚氰胺聚磷酸盐

聚磷酸铵(ammonium polyphosphate, APP), 又被称为多磷酸铵, 当其进入木材组织后, 可在内部加快木材分解和脱水成碳, 常用作扑灭火灾的重要化学品以及木材的防火阻燃剂^[46-48], 属氮-磷系抑制剂。近年来, 学者们逐渐探索 APP 在气体、粉尘燃爆抑制方面的应用^[49-50]。Wu 等^[51]研究发现, 聚 APP 改性气溶胶对煤尘爆炸具有显著的抑制作用, 抑制机理如图 6 所示。

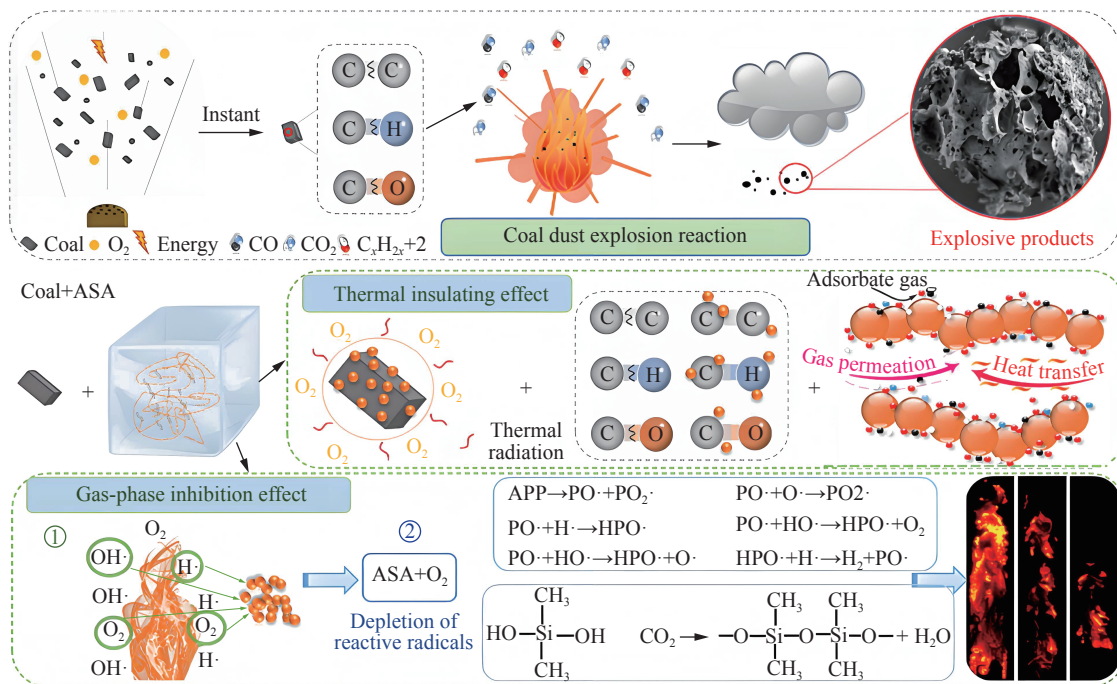


图 6 聚磷酸铵抑制煤尘爆炸的机理^[51]

Fig. 6 Mechanism of APP suppressing coal explosion^[51]

APP 在抑制过程中表现出双重抑制作用。在物理作用层面, APP 受热分解吸收大量热量, 降低维持火焰持续传播所需的能量; 分解产生的 NH_3 和 H_2O 对燃气和氧气可起到稀释和隔绝的作用^[52]。在化学作用层面, 聚磷酸铵分解产生的 NH_3 和磷氧自由基能够与关键自由基 $H \cdot$ 和 $OH \cdot$ 反应:



阻碍链式反应的进行^[53-55]。

三聚氰胺聚磷酸盐(melamine polyphosphate, MPP)是一种高效的氮-磷膨胀型阻燃剂,具有热稳定性好、产烟率低、不易受潮等优点。MPP 阻燃剂在高温下通过吸热分解产生泡沫状的焦炭层,覆盖在燃烧物质表面,隔绝空气,从而起到阻燃作用。李珍宝等^[56]研究了容积 20 L 的球形实验装置中 MPP 对铝镁合金粉尘爆炸的抑制作用,发现:70% 的 MPP 质量添加量可实现对铝镁合金粉尘的完全抑爆;MPP 受热分解可吸收大量反应热,减缓燃烧反应的进行,同时,MPP 分解产生的 $\text{HPO}_3 \cdot$ 和 $\text{NH}_2 \cdot$ 等活性自由基可与 $\text{O} \cdot$ 、 $\text{OH} \cdot$ 和 $\text{HO}_2 \cdot$ 等活性基团反应,阻碍链式反应的进行,其对镁铝合金粉尘燃爆的抑制机理如图 7 所示。王秋红等^[57]通过开展实验对比了 ABC、三聚氰胺氰尿酸盐(melamine cyanurate, MCA)和 MPP 粉对铝粉尘云爆炸的抑制效果,发现 MPP 由于结合了氮系和磷系抑制剂的优势,表现出的抑制效果较优。

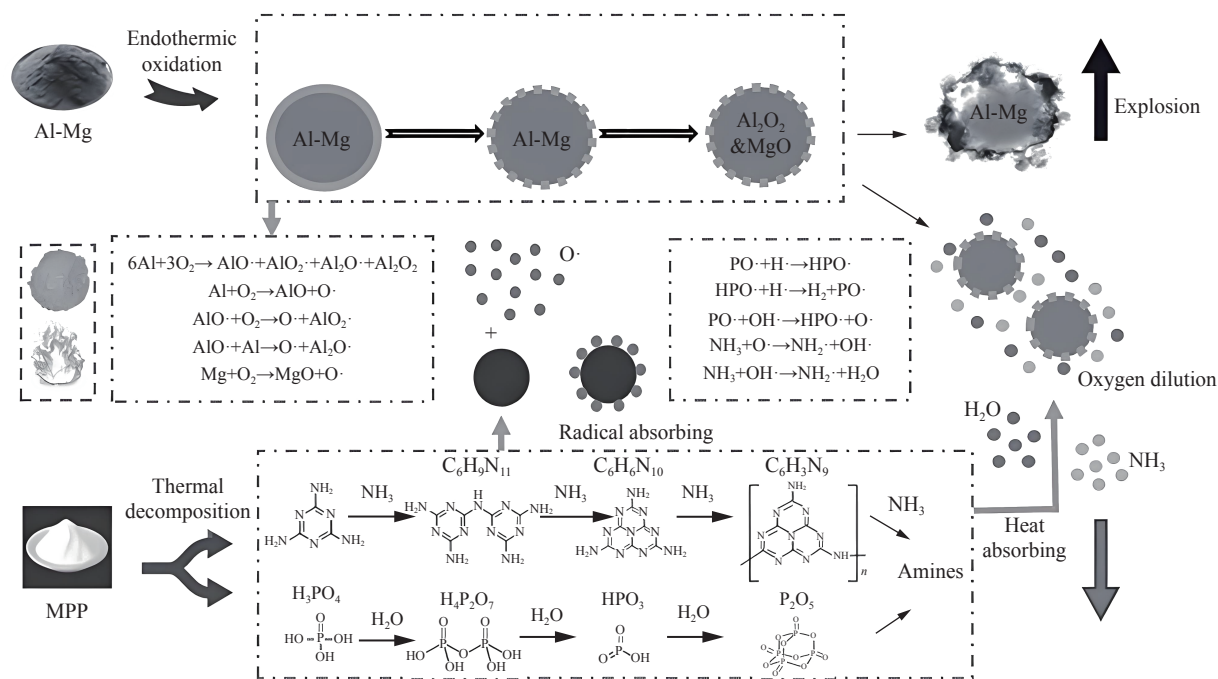


图 7 MPP 抑制铝镁合金粉尘爆炸机理^[56]

Fig. 7 Mechanism of MPP suppressing Al-Mg powder explosion^[56]

1.1.5 三聚氰胺氰尿酸盐 (MCA) 和尿素

MCA 阻燃剂为白色结晶粉体,是一种不含卤素的高效氮系阻燃剂,主要用于尼龙、橡胶等高分子材料的阻燃。近年来,研究人员逐渐扩展 MCA 在粉体、气体燃爆抑制方面的应用。杨振欣^[58]实验对比了竖直管道内 SiO_2 、MPP、MCA 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对煤尘爆炸的抑制性能,发现: SiO_2 主要表现为吸热、隔绝的物理作用,抑制性能较差;MPP、MCA 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 均表现为物理和化学的双重抑制作用,MCA 热分解产物主要为含氮化合物,MPP 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 结合了氮系和磷系抑制剂的优点,抑制效果优于 MCA,

MPP 和 MCA 对煤尘爆炸的抑制机理如图 8 所示。姜海鹏^[59] 通过实验和模拟手段分析了 MCA 和 MPP 对铝粉尘爆炸的抑制作用, 发现: 当铝粉尘燃烧以气相反应为主或由气相反应和表面反应共同控制时, MCA 的临界抑爆浓度均低于 MPP。王秋红等^[60] 对比了容积 20 L 的近球形爆炸实验系统中 ABC、MCA 和 MPP 对铝粉云爆炸的抑制效果, 发现: ABC 粉显著延长铝粉发生快速氧化反应的时间和提高了反应的起始温度, 抑制效果最优。张术琳^[61] 研究了 CO₂/MCA 气固两相抑制剂对铝粉尘爆炸的协同抑制作用, 发现添加 MCA 可显著降低 CO₂ 抑爆所需浓度。此外, 张术琳等^[62] 利用 Chemkin 软件对 NH₄H₂PO₄、MCA 抑制甲烷/乙烯/氢气多元混合可燃气体爆炸的过程进行了数值模拟, 发现: ABC 干粉的抑制效果优于 MCA, MCA 主要通过 HNCO 消耗 H· 和 OH· 自由基, 从而切断链式反应的进行。

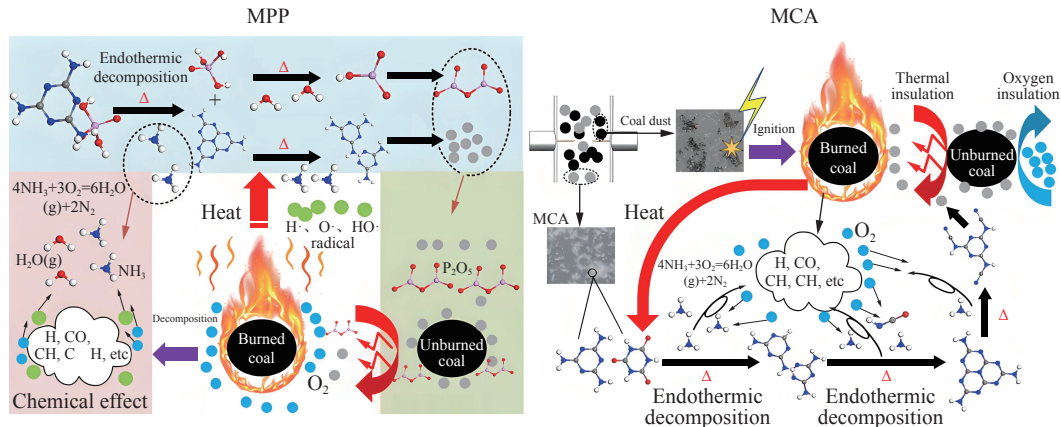


图 8 MPP 和 MCA 对煤尘爆炸的抑制机理^[58]

Fig. 8 Mechanisms of MPP and MCA suppressing coal explosion^[58]

尿素(CH₄N₂O), 又被称为碳酰二胺或脲, 在常温下为白色结晶体, 由于其对土壤的破坏作用小且含氮量高, 常被用作化学氮肥。由于尿素有着优良的热分解特性, 近年来, 研究人员尝试将其应用于燃爆抑制, 属氮系抑制剂。余明高等^[63] 和王天政^[64] 研究了 Al(OH)₃、Mg(OH)₂ 和尿素的热解特性, 发现: 尿素的热解起始温度较低, 且热解吸热量较高。随后的瓦斯抑爆实验证明, 尿素的抑爆性能优于 Al(OH)₃ 和 Mg(OH)₂。李孝斌等^[65] 采用光谱和数据同步分析方法, 对尿素抑制甲烷爆炸的过程进行了分析计算, 发现: 尿素的加入可有效降低甲烷的爆炸压力, 延长甲烷的爆炸感应期; NO· 和 HNO· 含量的升高或 CN·、CHO· 和 OH· 含量的降低, 有利于抑制甲烷爆炸。尿素在燃爆抑制过程中表现为物理和化学的双重抑制作用^[66]。

(1) 物理作用: 尿素的热解过程可吸收大量反应热, 降低传热速度和反应速率。其热解过程可描述为:



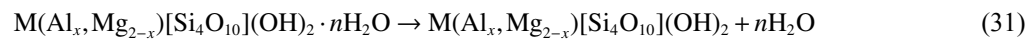
(2) 化学作用: 尿素热解产生的大量 NH₃ 和 HNCO 可与 H· 和 OH· 等反应自由基反应, 降低活性自由基数量, 减缓链式反应进程。NH₃ 捕获活性自由基的过程可见反应式 (5)~(7), HNCO 相关反应^[65] 如下:



1.2 惰性粉体抑制剂

1.2.1 硅酸盐矿物粉体

蒙脱石是一种储量丰富的镁铝硅酸盐矿物, 具有较大的比表面积和层状孔隙结构。这种特殊的内部结构作为抑制剂时具有良好的吸热和吸附性能。根据不同孔隙层间的主要阳离子种类, 蒙脱石可主要分为钠基化蒙脱石、钙基化蒙脱石以及其他组分变体。蒙脱石对燃爆过程的抑制机理主要体现为物理作用。(1) 蒙脱石是一种介孔材料, 具有良好的吸附和扩散性能, 能够充分接触爆炸链反应的自由基, 增强壁面对自由基的破坏作用, 促使自由基大量减少, 导致爆炸链反应中断; (2) 蒙脱石热分解反应如下:



产生的水蒸气不仅可以降低氧气的浓度, 也可以吸收大量反应热, 抑制反应的持续进行。

坡缕石又称凹凸棒石, 主要由 SiO_2 、 MgO 等物质组成, 是一种含水富镁铝硅酸盐黏土矿物, 其具有层状、链状、纤维状晶体结构和纳米级孔道, 吸附性、悬浮性、分散性和离子交换性良好, 生产成本低廉, 目前坡缕石粉体常被用作催化和吸附材料。伊宏伟^[67]利用容积 20 L 的球形容器和垂直管道装置测试了蒙脱石和坡缕石对甲烷爆炸的抑制效果, 发现两者的最佳抑制质量浓度分别为 0.16 和 0.24 g/L。王枫潇^[68]对蒙脱石、坡缕石、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KHCO_3 开展研究, 结果表明: 坡缕石分子表面负电势区域最高, 最易在化学反应中产生亲核反应活性中心, 且过渡态能垒和吉布斯自由能垒相对较低, 因此, 对于管网甲烷爆炸, 4 种粉体中坡缕石的抑制效果最好, 蒙脱石的次之, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的再次之, KHCO_3 的最差。4 种粉体的抑爆基元反应能垒 ΔE 和反应热 ΔH 如表 2 所示。

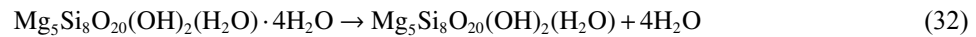
表 2 4 种粉体抑爆基元反应能垒和反应热^[68]

Table 2 Energy barrier and reaction heat of elementary reaction for four powers suppressing explosion^[68]

抑制剂 编号	反应	$\Delta E/(\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\Delta H/(\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1})$	抑制剂 编号	反应	$\Delta E/(\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\Delta H/(\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1})$		
蒙脱石	1	$\text{Al}+3\text{OH}\cdot\rightarrow\text{Al}(\text{OH})_3$	84.6	-289.4	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	1	$\text{PO}\cdot+\text{H}\cdot\rightarrow\text{HPO}$	-27.6	
	2	$\text{Ca}+2\text{OH}\cdot\rightarrow\text{Ca}(\text{OH})_2$		-178.2		2	$\text{HPO}+\text{H}\cdot\rightarrow\text{H}_2+\text{PO}\cdot$	548.6	
	3	$\text{Mg}+2\text{OH}\cdot\rightarrow\text{Mg}(\text{OH})_2$		-151.6		3	$\text{NH}_3\cdot+\text{O}_2\rightarrow\text{H}_2\text{NO}+\text{OH}\cdot$	28.9	17.1
	4	$\text{AlO}+\text{H}\cdot\rightarrow\text{Al}+\text{OH}$		37.1		4	$\text{NH}_3\cdot+\text{O}_2\rightarrow\text{NH}_2\cdot+\text{HO}_2$	30.6	57.5
	5	$\text{CaO}+\text{H}\cdot\rightarrow\text{Ca}+\text{OH}$	22.6	-98.4		5	$\text{NH}_3\cdot+\text{OH}\cdot\rightarrow\text{NH}_2+\text{H}_2\text{O}$		-10.2
	6	$\text{MgO}+\text{H}\cdot\rightarrow\text{Mg}+\text{OH}$	24.5	-124.6	KHCO_3	1	$2\text{KHCO}_3\rightarrow\text{K}_2\text{CO}_3+\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$	45.6	-12.3
	7	$\text{AlO}+\text{O}\cdot\rightarrow\text{Al}+\text{O}_2$		-179.4		2	$\text{K}_2\text{CO}_3\rightarrow\text{K}_2\text{O}+\text{CO}_2$	19.9	48.3
	8	$\text{CaO}+\text{O}\cdot\rightarrow\text{Ca}+\text{O}_2$		-93.3		3	$\text{K}_2\text{O}+\text{H}_2\text{O}\rightarrow 2\text{KOH}$	21.6	-64.4
	9	$\text{MgO}+\text{O}\cdot\rightarrow\text{Mg}+\text{O}_2$	18.9	-88.9		4	$\text{K}\cdot+\text{O}_2\rightarrow\text{KO}_2$	32.4	-19.9
1	$\text{Al}+3\text{OH}\cdot\rightarrow\text{Al}(\text{OH})_3$	78.9	-290.2	5		$\text{K}+\text{OH}\cdot\rightarrow\text{KOH}$		-50.4	
2	$\text{Ca}+2\text{OH}\cdot\rightarrow\text{Ca}(\text{OH})_2$		-178.8	6		$\text{K}\cdot+\text{O}\cdot\rightarrow\text{KO}\cdot$	50.2	-121.3	
3	$\text{Mg}+2\text{OH}\cdot\rightarrow\text{Mg}(\text{OH})_2$		-152.1	7		$\text{KO}\cdot+\text{H}\cdot\rightarrow\text{KOH}$	126.9	-95.0	
4	$\text{AlO}+\text{H}\cdot\rightarrow\text{Al}+\text{OH}$		37.5	8		$\text{KO}\cdot+\text{O}\cdot\rightarrow\text{KO}_2$	28.3	-168.6	
5	$\text{CaO}+\text{H}\cdot\rightarrow\text{Ca}+\text{OH}$	20.8	-98.8	9		$\text{KOH}+\text{H}\cdot\rightarrow\text{K}\cdot+\text{H}_2\text{O}$	39.6	-55.5	
6	$\text{MgO}+\text{H}\cdot\rightarrow\text{Mg}+\text{OH}$	21.6	-124.9	10		$\text{KOH}+\text{OH}\cdot\rightarrow\text{KO}\cdot+\text{H}_2\text{O}$	78.9	-24.4	
7	$\text{AlO}+\text{O}\cdot\rightarrow\text{Al}+\text{O}_2$		-179.8	11		$\text{KOH}+\text{O}\cdot\rightarrow\text{KO}\cdot+\text{OH}\cdot$	66.7	-122.4	
8	$\text{CaO}+\text{O}\cdot\rightarrow\text{Ca}+\text{O}_2$		-93.9						
9	$\text{MgO}+\text{O}\cdot\rightarrow\text{Mg}+\text{O}_2$	16.8	-89.1						

注: 1 cal=4.184 J。

(1) 物理作用方面: 坡缕石是一种介孔材料, 具有良好的吸附和扩散性能, 能够充分接触爆炸链反应的自由基, 增强壁面对自由基的破坏作用, 促使自由基大量减少, 并导致爆炸链反应中断。坡缕石的分解作用如下式:



(2) 化学作用方面: 天然坡缕石粉体含有 M^{n+} (M 代表 Ca 、 Mg 、 Al 等) 等多种金属元素离子, 可与 $\text{H}\cdot$ 、 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{O}\cdot$ 等活性自由基发生反应, 从而中断链式反应:



高岭石是一种具有层状结构的天然黏土矿物, 具有较大的比表面积以及良好的吸附性和电绝缘性^[69-70]。相比蒙脱石, 高岭石不存在晶格取代现象, 无法通过阳离子交换法将分子插入层间, 且高岭石片层间通过较强的氢键和范德华力相结合, 难以进行剥离和插层反应^[71]。余明高等^[72]采用插层改性的方法制备了 3 种改性高岭土抑制剂, 改性后的高岭石颗粒团聚程度显著降低, 由于其表现出高岭石和插层粒子的抑制作用, 对瓦斯煤尘的抑爆性能优于未改性粉体。高岭石的抑制效应主要体现为物理作用方面: 高岭石由于具有较大的比表面积, 可物理吸附燃烧反应过程的自由基, 阻断链式反应的进行。

海泡石是一种纤维状的含水硅酸镁, 分子式为 $\text{Mg}_8(\text{H}_2\text{O})_4[\text{Si}_6\text{O}_{16}]_2(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, 通常呈白、浅灰、浅黄等颜色, 不透明也没有光泽, 具有独特的层状分子结构。海泡石疏松多孔, 具有高比表面积和优异的吸附性能。苏洋等^[73]利用容积 20 L 的球形爆炸装置测试了 CO_2 和海泡石对甲烷爆炸的协同抑制作用, 发现气固两相抑制剂对含氢量较高的预混气体具有良好的抑制效果。海泡石粉体热解过程中热量吸收可达 339.94 J/g, 具有良好的吸热效应。此外, 海泡石热解过程中产生的金属离子可与关键活性自由基 $\text{OH}\cdot$ 和 $\text{H}\cdot$ 结合, 中断链式反应的进行, 其抑制机理如图 9 所示。

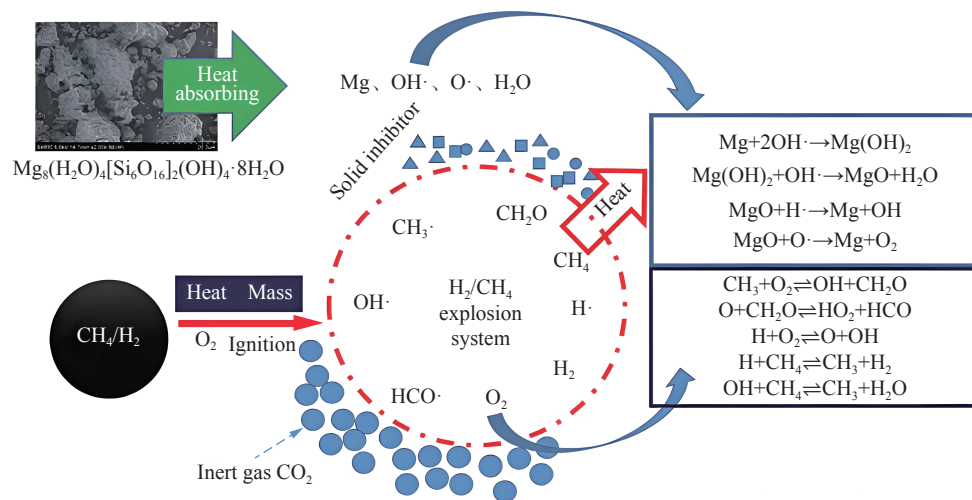


图 9 CO_2 -海泡石粉体对甲烷爆炸的抑制机理^[73]

Fig. 9 Suppression mechanism of CO_2 -sepiolite powder on methane explosion^[73]

沸石是一种具有网状空间结构的碱金属硅铝酸盐, 价格低廉, 储量丰富。沸石的特殊结构使其具有较高的吸附性和表面活性, 同时其自身含有大量的金属基团, 使其具有较强的自由基消耗能力。倪小敏等^[74]采用盐酸活化和氯化铁溶液浸泡法制备了载铁改性沸石, 由于负载的铁离子可参与消除反应自由基, 使得其对甲烷燃爆的抑制效果优于未改性沸石。王燕等^[75]选取氨丙基三甲氧基硅烷和乙烯基三甲氧基硅烷 2 种硅烷偶联剂对沸石进行了表面改性, 制取了氨丙基沸石和乙烯基沸石, 两者对乙烯燃爆的抑制效

果均优于未改性沸石,这是由于改性沸石表面基团可在高温下脱离,与自由基结合,降低自由基含量。为实现气固两相的协同增效,倪小敏等^[76]采用减压吸附法将溴氟丙烯负载至 13X 沸石表面,实验结果表明,相比普通干粉灭火剂,新型材料热解释放的含氟和含溴物质可大量捕捉反应自由基,使得其对汽油油池火的灭火效果有了显著提升。沸石的抑制效应主要体现为物理作用方面:沸石受热分解吸收反应热量,使燃气分子之间的热传递效率下降;沸石为具有较大比表面积的多孔材料,在燃爆过程中可吸附反应自由基,中断链式反应^[75]。

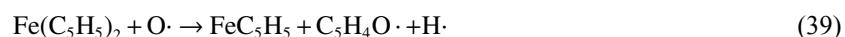
1.2.2 二茂铁

二茂铁为有机金属化合物,又称二环戊二烯合铁,化学式为 $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$,为橙黄色晶型固体,具有类似于苯的一些芳香性。20 世纪 90 年代,研究人员发现挥发性铁化合物可抑制火焰烟尘的产生^[77],降低火焰传播速度^[78]。200 ppm 的气化二茂铁可显著降低甲烷/空气预混火焰的燃烧速度^[79]。

二茂铁对燃爆过程的抑制作用表现在物理和化学 2 个层面。

(1) 物理作用:与火焰接触后,二茂铁粉体吸热升华产生的二茂铁蒸气具有较高的蒸气压,可以稀释燃气和氧气的浓度;二茂铁粉体升华过程以及二茂铁蒸气分解过程可以吸收反应热量,降低燃烧区的温度,减缓链式反应的进行。

(2) 化学作用:当温度达到分解温度后,二茂铁蒸气开始吸热分解,消耗火焰区域的 $\text{H}\cdot$ 和 $\text{O}\cdot$ 自由基生成 FeC_5H_5 , FeC_5H_5 可继续分解或与 $\text{H}\cdot$ 自由基反应生成 Fe 原子。上述过程可用如下反应式描述:



生成的 Fe 原子可反应生成中间产物,共同可参与链式反应,消耗氧气或反应自由基,其中, FeO 是反应过程中始终存在的中间产物,可与 FeOH 和 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 共同消耗 $\text{H}\cdot$ 和 $\text{OH}\cdot$ 自由基^[80]:



1.2.3 硅藻土

硅藻土是一种由古代硅藻遗体组成的硅质沉积岩,主要组分为 SiO_2 ,同时含有少量的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等氧化物和有机质。硅藻土纳米级微孔结构使得其孔隙率可达 90%~92%,具有较大的比表面积。由于表面原子配位数不足造成的悬空键多,表面活性高,对瓦斯爆炸自由基链式反应过程中活性基团的吸附、销毁能力及选择性增强,降低链式反应速率的效果更显著,所以硅藻土对瓦斯爆炸具有一定的抑制作用^[81]。程方明等^[82-83]和郭秀瑞等^[84]通过实验研究发现,硅藻土粉体对瓦斯爆炸的抑制效果优于石英粉,硅藻土表面的多孔结构和表面羟基对材料改性提供了可能。何文浩等^[85]基于量子化学理论,利用过渡态方法和吸附理论对硅藻土抑制瓦斯爆炸的机理进行了分析,发现:硅藻土中的连生硅醇结构可消耗反应自由基,并可吸附 HCHO 等中间产物,由此对瓦斯爆炸产生抑制作用。

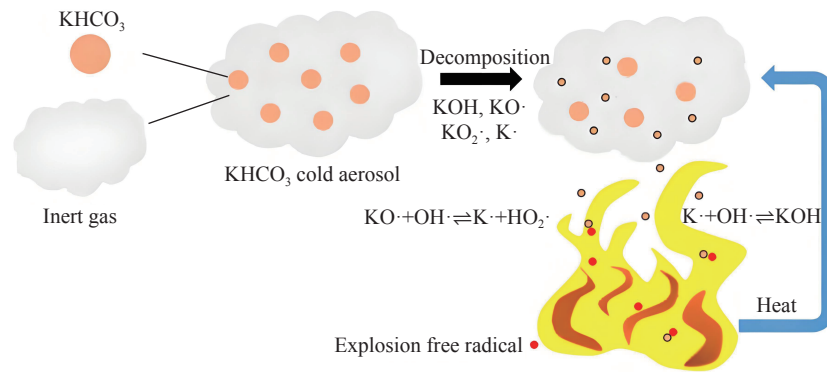
1.2.4 赤泥

赤泥又称红泥,为铝土矿中提炼氧化铝后排出的工业固体废物,主要由 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等氧化物组成,经过脱碱、胶凝等工艺处理后,粒径分布在几十纳米至几十微米之间,且具有较大的比表面积和丰富的空隙结构,常被用作污水和废气治理的吸附材料以及催化剂载体材料^[86]。与火焰接触过程中, SiO_2 可吸收反应产生的热量,减弱反应的进行^[87]。此外,具有高表面活性的赤泥可迅速吸附附近的活性自由基,使其由游离态变为吸附态。吸附态自由基与游离自由基反应,使得系统中游离态自由基和活性基团不断被转化成吸附态或生成稳态物质,游离自由基和活性分子的浓度降低,阻碍链式反应的进行。余明高等^[86]以拜耳法赤泥为原料,通过脱碱、改性处理得到了超细改性赤泥粉体,研究发现该分体对瓦斯爆炸具有更好的抑制效果。改性过程中, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等金属氧化物变成了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等金属氢氧化物,其对火焰的抑制作用可见 1.1.3 节的分析。孔杰^[88]通过酸浸出、溶胶-凝胶法对赤泥进行了改性处理,使得改性赤泥形成多孔隙空间网状支架结构,具有较大的比表面积和较高的表面能,可以在抑爆过程中更有效地吸附活性自由基,减缓链式反应的进行。

1.3 气溶胶

气溶胶是以固体或液体为分散质(又称分散相)和气体为分散介质所形成的溶胶,颗粒粒径通常在 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 。气溶胶抑制剂具有灭火效率高、制造成本低、腐蚀低、污染小、应用范围广等优点,是哈龙灭火剂的理想替代品^[1]。基于生成温度的不同,气溶胶主要分为热气溶胶和冷气溶胶。热气溶胶由氧化剂、还原剂和辅料组成,经氧化还原反应后形成气溶胶。冷气溶胶通常由驱动气体和超细粉体组成,无需进行氧化还原反应。基于固体颗粒的不同,热气溶胶可分为 K 型和 S 型等不同种类。K 型气溶胶的固体颗粒主要由 K_2CO_3 、 KHCO_3 和 K_2O 组成,极易吸湿,造成精密仪器电路板的损坏。S 型气溶胶选用硝酸锶为主氧化剂,弥补了 K 型气溶胶的缺点。屈丽娜^[89]对比了 S 型和 K 型气溶胶对甲烷燃爆的抑制性能,发现: S 型气溶胶的抑制效果优于 K 型气溶胶,在相同的甲烷浓度下, S 型气溶胶达到完全抑制所需浓度低于 K 型气溶胶。由于热气溶胶形成过程中会释放热量,导致局部温度升高,这对于存在可燃气体的区域具有一定的危险性,目前学术界主要针对冷气溶胶开展研究。气溶胶的抑制机理包括物理和化学的双重作用:物理作用方面,主要表现为热解吸热、隔绝、稀释、窒息等作用;化学作用方面,气溶胶颗粒热解产生的活性离子可与反应自由基结合,阻断链式反应的传递^[89]。目前,气溶胶干粉灭火剂的制备方法主要包括球磨法、溶液喷雾干燥技术、超音速气流粉碎技术、超声破碎法和水相合成法等^[90]。颗粒粒径是影响冷气溶胶抑制性能的关键参数,粒径极小的颗粒可进行强烈的布朗运动,表现出类似气体的扩散能力,且可以大幅延长气溶胶在作用区域的悬浮时间^[1]。

任常兴等^[91-92]和 Ren 等^[93]采用气流粉碎法得到制备了粒径为 $5 \mu\text{m}$ 的铵盐冷气溶胶,并利用云母粉、滑石粉、硬脂酸镁等添加剂改善了颗粒的分散性和流动性,实验结果表明:冷气溶胶抑制剂可长时间悬浮于爆炸区域内,显著降低了油气燃爆的压力峰值和最大升压速率,延长了爆炸感应期。黄超等^[94]制备了粒径为 25 nm 的超细 $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 冷气溶胶抑制剂,该抑制剂通过捕捉链式反应的自由基,对一元醇燃爆具有显著的抑爆效果。Krasnyansky^[95]通过实验研究发现少量冷气溶胶抑制剂可减弱甲烷和甲烷-煤尘的爆炸强度,爆炸区域内各种气溶胶的浓度需达到一定阈值可实现完全抑制。蒋新生等^[96]以聚磷酸铵和硫酸铵为基体材料,以云母粉和活性白土作为抗振实性添加剂,以滑石粉和白炭黑作为分散助剂,以硬脂酸镁作为防潮剂,以 NaHCO_3 作为膨松剂,以 Na_2CO_3 作为粉碎助剂,以疏水性 SiO_2 等作为复合改性剂,采用超音速气流粉碎法制备了超细冷气溶胶并进行了改性,所得改性气溶胶具有良好的稳定性和分散性,并对油气燃爆具有显著的抑制效果。王燕等^[97]发现惰性气体驱动的 KHCO_3 冷气溶胶对甲烷燃爆的抑制效果相比空气驱动出现了显著提升,两者发挥了协同抑制作用(图 10),他们通过实验得到了惰性气体与 KHCO_3 冷气溶胶的最佳抑制配比。喷粉压力的变化可以显著影响 KHCO_3 气溶胶的分散状态,抑制效果随着喷粉压力的升高而逐渐增强,但存在一个临界喷粉压力,高于该临界值后,抑制效果提升不明显^[98]。

图 10 惰性气体驱动的 $KHCO_3$ 冷气溶胶协同抑制机理^[97]Fig. 10 Mechanism illustration in explosion suppression of $KHCO_3$ cold aerosol driven by inert gas^[97]

2 复配抑制粉剂

复配技术即是具有抑制作用的 2 种或 2 种以上的物质按一定比例混合加工, 并运用化学的方法生产出新的特性的混合物。由此, 不同性质作用原理的物质之间的搭配, 可实现协同效应, 以达到“1+1>2”的效果。为提高复配粉剂的综合性能, 需要通过各类添加剂进行改性, 云母粉和活性白土可用作抗振实性助剂, 滑石粉、白炭黑可用作分散助剂, 硬脂酸镁可用作防潮助剂, 碳酸氢钠可用作膨松助剂, 碳酸钠可用作粉碎助剂, 疏水二氧化硅可用作助磨剂^[96]。

2.1 碳酸氢盐复配

由于易于潮解和粘连, $KHCO_3$ 抑爆特性无法发挥到极致。王雪燕^[24]通过溶析结晶法和机械球磨法, 将 $KHCO_3$ 与蒙脱土或二茂铁进行复合, 使得团聚黏连现象得到显著改善。随后的抑制实验^[99-100]表明, 复配粉体的抑制效果优于单体粉体; 当蒙脱土表面 $KHCO_3$ 的质量分数为 45% 和二茂铁的质量分数为 15% 时, 抑制效果最优, 相比蒙脱土单独作用, 最大升压速率的下降率从 35.2% 提高至 86%, 相比二茂铁单独作用, 最大升压速率的下降率从 43.8% 提高至 95.2%。王燕等^[101]和 Wang 等^[102]采用反溶剂-溶析法制备了具有核壳结构的 $KHCO_3$ /赤泥和 $NaHCO_3$ /赤泥复合粉体, 载体为改性赤泥, 核壳型复合粉体的抑制效果优于单一赤泥或 $KHCO_3$ 、 $NaHCO_3$ 粉体, 相比纯赤泥粉体, 负载质量 30% 的 $KHCO_3$ /赤泥复合粉体将压力峰值的下降率从 13.1% 提高至 37.5%, 最大升压速率的下降率从 47.8% 提高至 93.2%。程义伸^[103]采用溶析结晶法将 $KHCO_3$ 、 $NaHCO_3$ 负载至赤泥载体表面, 实验结果表明: 质量负载量为 30% 的 $NaHCO_3$ /赤泥复合粉体抑制效果较优, 压力峰值和最大升压速率分别下降 40.4% 和 94.1%。贝壳粉未经活化处理后具有多孔纤维双螺旋结构, 密度低, 比表面积大, 具有很强的吸附性和悬浮力。Zhang 等^[104]采用气流粉碎法制备了超细 $NaHCO_3$ /贝壳粉复合粉剂, 当贝壳粉涂覆 $NaHCO_3$ 后, 粉剂的整体吸水性能降低, 团聚现象减弱, 分散性明显改善。贝壳粉的加入增强了复合粉剂对自由基的物理吸附性能, 使得其对煤尘爆炸的抑制效果显著优于 $NaHCO_3$ 或贝壳粉。Yang 等^[105]利用 $NaHCO_3$ 对坡缕石进行了改性, 在制备过程中, 坡缕石中的 Fe 和 Al 离子转化为 $Fe(OH)_3$ 和 $Al(OH)_3$, 改性粉体发挥了各组分的协同增效作用, 能够有效吸收活性自由基, 且具有更好的热解吸热效果, 对甲烷爆炸的抑制效果更好。Liu 等^[106]采用机械化学法制备了 $KHCO_3$ /沸石的复合粉剂, 研究发现: 复合粉剂的分散性明显改善, 对甲烷燃爆的抑制效果明显优于单组分的 $KHCO_3$ 和沸石, $KHCO_3$ 质量分数为 45% 的复合粉剂可将压力峰值的下降率分别提高 37.9% 和 26.9%。Ni 等^[107]制备了具有核壳结构的 $NaHCO_3$ /沸石纳米复合粉剂, 该复合粉剂与火焰接触后, $NaHCO_3$ 外壳热解破裂, 释放内部的沸石颗粒, 小尺度实验结果表明: 复合粉剂对汽油油池火的抑制效果优于 $NaHCO_3$ 干粉, 其抑制机理如图 11 所示, 两者发挥了协同抑制作用。

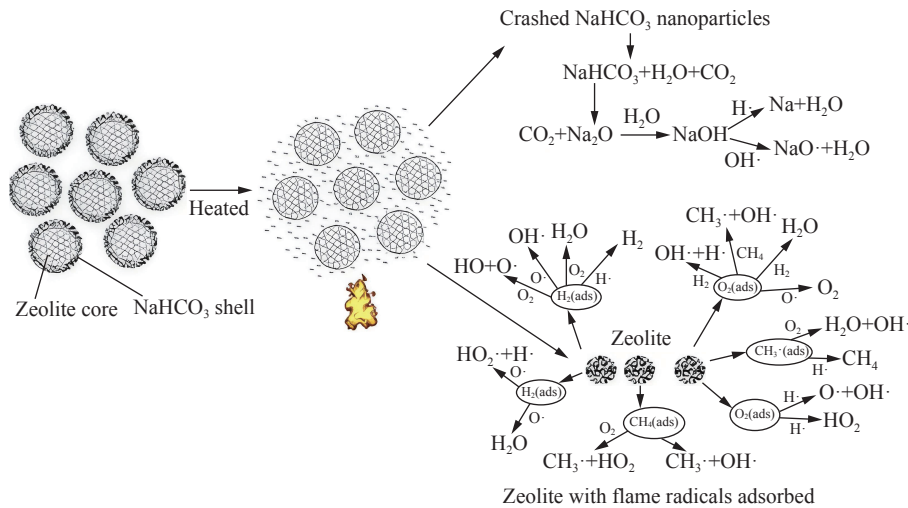


图 11 NaHCO₃/沸石复合粉剂对汽油油池火的抑制机理抑制机理^[107]

Fig. 11 Suppression mechanism of NaHCO₃/zeolite hybrid powder on on gasoline pool flame^[107]

2.2 氮系或氮-磷系抑制剂复配

Wang 等^[108] 利用葡萄糖酸制备了多羟基官能团修饰的蒙脱石粉体, 相比未改性粉体, 该蒙脱石粉体表现了对甲烷爆炸更好的抑制性能。随后, Wang 等^[109] 利用硅烷偶联剂对蒙脱石粉体进行了功能化处理, 制备了羟基、硫醇和尿素改性的新型抑制粉剂。由于羟基和尿素改性的蒙脱石粉体容易生成 NH₄⁺、NCO⁻ 和 OH⁻ 等自由基, 有利于中断爆炸链式反应, 对甲烷燃爆的抑制效果较好。针对甲烷爆炸, 袁必和^[110] 等合成了新型的多孔矿物-聚磷酸铵 (APP) 复合粉体, 实验结果表明: MTS 与 APP 的质量之比为 1 : 3 时, 协同抑制效果最显著, 复合粉体相较单组分 APP, 可将压力峰值的下降率从 19.2% 提高至 34.6%, 复合粉体的抑制机理如图 12 所示; 除 APP 的化学抑制作用外, MTS 矿物较大的比表面积和丰富的内部通道使得其对活性自由基具有良好的吸附性能。贺涛^[111] 采用机械球磨法将不同比例的 APP 与前述的改性高岭土进行复配, 当复合粉体种 APP 的质量分数为 35% 时, 两者的协同增效作用最强, 抑制效果最优, 相比单组分 APP, 压力峰值的下降率和最大升压速率的下降率分别提高 25.7% 和 28.6%。Zhang 等^[112] 采用反溶剂法制备了 NH₄H₂PO₄/赤泥复合粉体, 该复合粉体具有明显的多孔结构, NH₄H₂PO₄ 质量分数为 30% 的复合粉体相较单组分赤泥, 压力峰值的下降率从 13.1% 提高至 35.1%, 最大升压速率的下降率从 47.8% 提高至 95.8%。考虑到水菱镁石常被用作阻燃添加剂, Wang 等^[113] 采用浸渍法将 KHCO₃ 负载至水菱镁石粉体的表面, 所得复合粉体扑灭油池火所用平均时间更短, 所需粉体量更少, 除 KHCO₃ 所起到的物理和化学抑制作用外, 水菱镁石可通过热解, 产生冷却、稀释和窒息等物理抑制作用, 材料表征结果表明: 复合粉体在保持流动性不变的情况下, 比表面积大于 NH₄H₂PO₄ 干粉, 其抑制机理如图 13 所示。Wang 等^[114] 将超细 ABC 干粉与羟基锡酸锌进行了复合, 研究发现: 得到的新型复合粉剂可通过物理吸热、隔绝和化学自由基捕捉等方式, 对氢气喷射火产生显著的协同抑制作用。针对合成气和煤尘的混合爆炸介质, Dai 等^[115] 制备了沸石和尿素的复合粉剂, 容积 20 L 的球形实验装

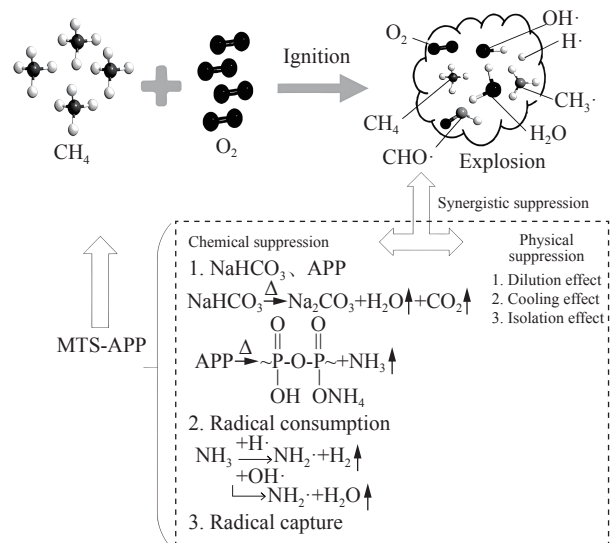


图 12 MTS/APP 复合粉体抑制甲烷爆炸机理^[110]

Fig. 12 Suppression mechanism of MTS/APP hybrid powder on methane explosion^[110]

... (Continuation of text from the previous block, describing the suppression mechanisms of MTS-APP and other hybrid powders.)

置测试结果表明: 沸石和尿素的质量之比为 1 : 1 时, 该复合粉剂的抑制效果最佳, 相比单组分尿素粉体, 爆炸压力峰值的下降率从 36.3% 提高至 50.8%, 相比单组分沸石粉体, 爆炸压力峰值的下降率从 25.4% 提高至 50.8%。Wang 等^[116] 将聚磷酸铵与多孔矿物材料进行了复合, 研究发现: 多孔材料丰富的孔道结构和较大的比表面积有助于活性自由基的吸附, 所得的新型复配材料在氮气的驱动下对甲烷燃爆的抑制效果优于单体材料, 实现了协同增效的目的, 相比单组分聚磷酸铵, 爆炸压力峰值的下降率从 6.5% 提高至 32.3%。基于燃爆抑制的 3 个作用层面, 左前明等^[117] 选取 $\text{Al}(\text{OH})_3$ (热解吸热)、聚磷酸铵 (减弱自由基活性) 和硅藻土 (吸附自由基) 进行材料复配, 合成了 3 种新型抑爆剂, 利用容积 20 L 的球形装置开展抑爆实验研究发现, 复配型抑爆剂对煤尘爆炸的抑制效果优于单体材料, 实现了协同增效。

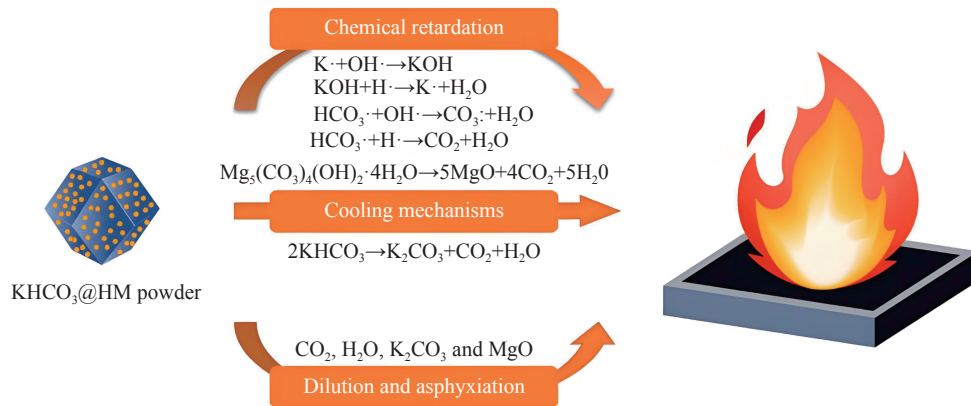


图 13 KHCO_3 /水菱镁石复合粉剂抑制机理^[113]

Fig. 13 Suppression mechanism of KHCO_3 /hydromagnesite hybrid powder^[113]

2.3 干水材料

干水呈现为白色粉末状物质, 本质上为由疏水性粉末涂层包覆的微小液滴, 具有良好的抗高温、抗高压性能, 是一种防水、无毒、吸附和隔热性能优良的超细颗粒环保材料^[118]。干水的制作方法于 1968 年被首次提出: 水在高速分散作用下破碎形成微小液滴, 而后由疏水性 SiO_2 可将小液滴包覆, 形成白色粉末状物质。干水中水分质量分数含水量可达 90% 以上, 具有良好的抗复燃性、分散性和绝缘性, 是一种性能优良的灭火材料^[119]。与火焰接触过程中, 干水中的水汽化吸热, 降低反应体系的温度, 同时稀释氧气的浓度。外层疏水性 SiO_2 的化学性质稳定, 有助于内部水分进入火焰区内部。此外, 干水可附着在可燃物表面, 隔绝氧气, 起到窒息作用。

为提高干水材料的燃爆抑制性能, 研究人员尝试将水替换为含有化合物的水溶液。Zhang 等^[120] 采用质量分数为 20% 的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 水溶液制备了改性干水材料, 实验研究发现: 改性干水材料可以显著降低氢气和天然气的燃爆特征参数; 相比普通的干水材料, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的加入提升了粉体热解吸热和捕获自由基的能力, 抑爆能力得到明显增强。卞建峰等^[121] 测试了 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性干水材料长时保存的稳定性, 发现将改性干水材料在密闭条件下置于 -18°C 和 71°C 环境中保存 30 天和 20 天后, 粒径和流动性没有显著变化。柴国强^[122] 选取 Na_2CO_3 、 CH_3COONa 、 NaCl 、 Na_2SO_4 和 NaH_2PO_4 对干水材料进行了改性, 实验研究发现: 物料质量比为 1 : 13、搅拌转速为 11 000 rpm、搅拌时间为 5 s 时, 干水结构最稳定, 形态最清晰, 尺寸分布较均匀; 对于木垛火, CH_3COONa 改性干水的抑制效果最佳; 对于油池火, NaCl 改性干水的抑制效果最佳。Han 等^[123] 采用高速分散法制备了 H_3PO_4 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性的干水灭火材料, 选用凝胶作为添加剂, 研究发现: H_3PO_4 改性的干水灭火剂对 A 类火灾的抑制效果较好, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性的干水灭火剂对 B 类火灾的抑制效果较好。

近年来, 研究人员逐步将干水材料应用于气体抑爆领域。陈先锋等^[124] 利用容积 20 L 的近球形爆炸装置测试了多种改性干水材料和普通干水材料对瓦斯燃爆的抑制效果, 实验结果表明: 当添加量较少时, 干水材料对爆炸起到促进作用; 干水材料的粒径对压力峰值影响较小, 对最大升压速率影响较大; 综合比较抑制效果, 尿素改性干水材料、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性干水材料、聚磷酸铵改性干水材料和普通干水材料

的抑制效果依次减弱。Wang 等^[125]将 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性的干水材料用于抑制甲烷爆炸, 相比未改性干水, 改性干水材料兼具物理和化学抑制作用, 对甲烷爆炸的抑制效果有明显提升。为提高疏水性 SiO_2 的结构强度, Wang 等^[126]在改性干水制备过程中添加了凝胶剂, 合成的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性海藻酸钙干水抑爆效能得到提升, 且颗粒结构相对稳定, 其抑制机理如图 14 所示。Zeng 等^[127]采用高吸水性树脂 (Super Absorbent Polymer, SAP) 和聚磷酸铵 (APP) 作为添加剂, 制备了一种新型聚磷酸铵凝胶改性干水材料, 研究发现: SAP 的加入显著提高了改性干水的稳定性和保水性, APP 的加入提高了复合粉体的化学抑制性能, 该新型干水材料对甲烷燃爆的抑制机理如图 15 所示。Guo 等^[128]采用 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KHCO_3 对干水

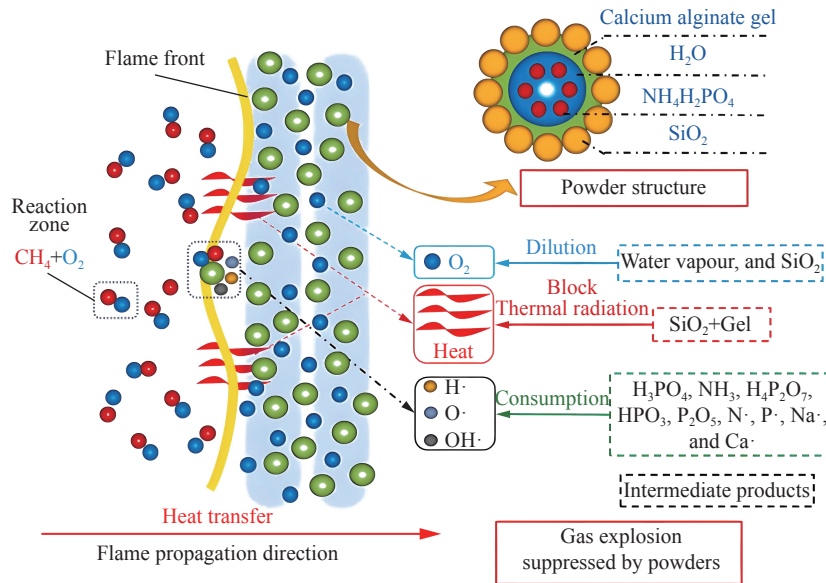


图 14 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性的海藻酸钙干水对甲烷爆炸的抑制机理^[126]

Fig. 14 Suppression mechanism of calcium alginate dry water modified by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ on methane explosion^[126]

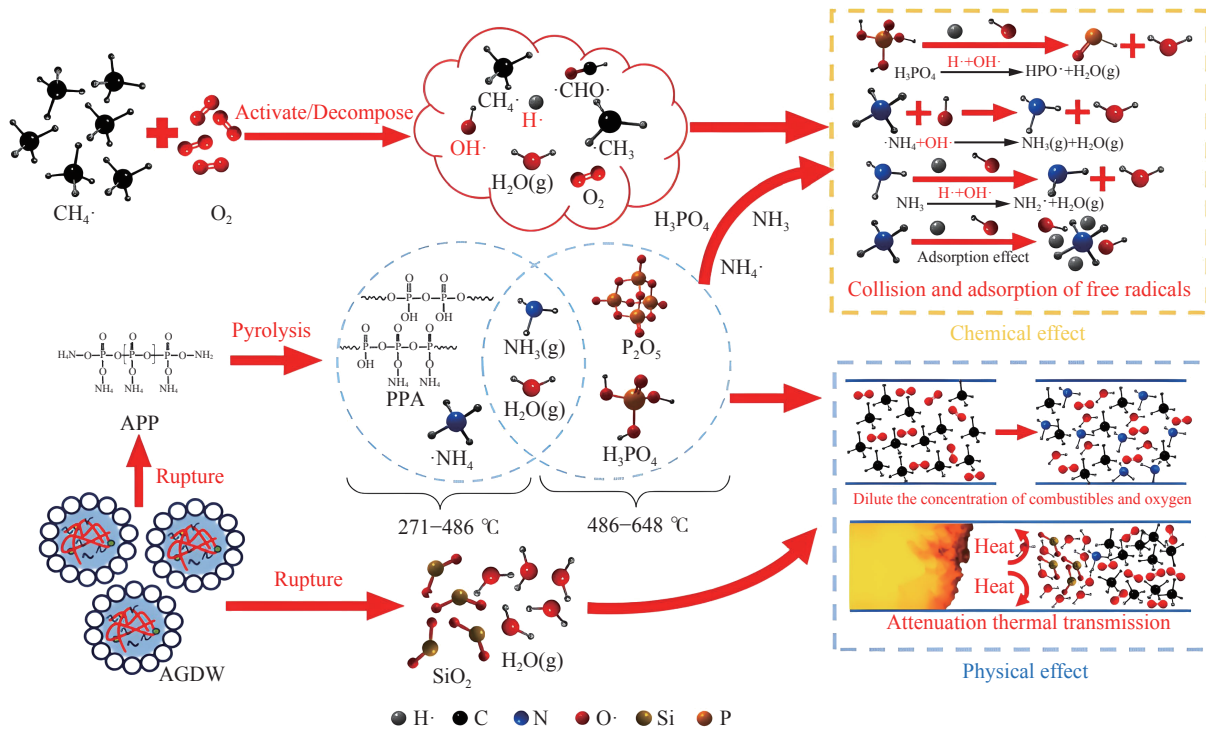


图 15 聚磷酸铵凝胶改性干水对甲烷燃爆的抑制机理^[127]

Fig. 15 Suppression mechanism of ammonium polyphosphate gel dry water on methane explosion^[127]

材料进行了改性, 确定了最佳的固液质量比、搅拌转速和搅拌时间, 分别为 1 : 10、8 000 r/min 和 40 s, 实验结果表明: 由于物理和化学的双重抑制作用, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性的干水材料对氢气射流火具有更优的抑制效果。

2.4 其他复配材料

现有抑制材料复配主要围绕碳酸氢盐和氮系、氮-磷系抑制材料开展, 部分研究涉及碱金属氢氧化物等相关复配研究较少的物质。李刚^[129]研究了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ /二茂铁复配抑制剂对瓦斯爆炸的抑制作用, 发现随着二茂铁质量分数由 10% 增至 50%, 复合粉体的抑爆性能逐渐增强。Sun 等^[53]将 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、APP 和高岭石进行了混合复配, 研究发现: 复合粉体综合了不同组分对甲烷燃爆的物理和化学抑制作用, 实现了协同增效的目的, 相比单组分 APP, 复合粉体可将最大升压速率的下降率从 12.5% 提高至 39.7%。为提高 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 干粉对甲烷爆炸的抑制效果, Wang 等^[130]制备了 $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 复合干粉, 通过实验确定了不同甲烷浓度所需的最佳复配比例。Ji 等^[131]采用共沉淀法制备了一种新型的 Mg-Al 水滑石粉体, 在 200 g/m^3 粉体浓度工况下, 单组分 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 作用下甲烷爆炸压力峰值的下降率分别为 42.3% 和 55.7%, 在复配粉体作用下可提高至 77.7%。在与火焰接触过程中, Mg-Al 水滑石的二维层状结构具有物理屏障作用, 可有效阻隔可燃气体和热量的传递。此外, Mg-Al 水滑石可热解吸收大量热, 分解产生的 CO_2 可降低反应物浓度, 减少化学自由基数量, 使得链式反应速率降低。Li 等^[132]以植酸(PA)和三聚氰胺(MEL)为构建单元, 采用超分子自组装技术合成了一种新型的 PA-MEL@ $\text{NH}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 抑制剂, 实验研究发现: 由于荷叶状结构特性, 该新型抑制剂的吸湿性显著减弱; 新型抑制材料发挥了各组分的协同抑制作用, 对化学计量比掺氢甲烷燃爆具有显著的抑制效果, 在 250 g/m^3 粉体浓度工况下, 相比纯气体爆炸, 爆炸压力峰值和最大升压速率分别下降 52.41% 和 81.69%。

3 结论与展望

对现有关于燃爆抑制粉体的研究进行了广泛的文献调研, 根据粉体种类和复配方法的不同, 对研究进展和抑制机理进行了分类总结和分析。尽管学术界针对可燃气体或粉尘燃爆抑制粉体以及阻燃剂的开发取得了显著进展, 但仍存在一些不足和急需解决的难题, 总结如下。

(1) 抑制粉体的抑制作用主要包括物理和化学 2 个层面, 物理作用主要表现为粉体的热解吸热, 热解产物的稀释、隔绝、窒息作用, 大比表面积表面结构对反应自由基的吸附; 化学作用主要表现为热解产物与反应自由基结合, 阻碍链式反应进行。根据现有实验研究可得出若干普适结论: 随着粉体浓度 (g/m^3) 的提高, 抑制效果逐渐增强, 部分研究中存在最佳抑制浓度, 即随着粉体浓度的提高, 抑制效果先增强后减弱; 对于不同体积分数的气体工况, 达到良好抑制效果所需的粉体浓度不同; 随着粉体粒径的减小, 抑制效果逐渐增强, 当达到某一阈值后, 粒径的减小不会带来抑制效果的显著增强, 根据目前超细干粉灭火剂的制备标准, 颗粒粒径需低于 $20 \mu\text{m}$ 可取得良好的抑制效果。

(2) 由于矿井爆炸事故的接连发生, 现有研究主要针对瓦斯及煤尘爆炸, 以碳酸氢盐和磷酸铵盐为活性成分、以蒙脱土和赤泥为基底材料的复配粉剂已取得了抑制性能的显著提升。然而, 对于氢气、乙烯等物质, 由于反应活性高、燃烧速度快, 现有的常规抑制粉体需要在较高粉体浓度下实现一定程度的抑制效果, 且在特定条件下, 抑制粉体的加入反而会造成氢气或富氢燃气燃爆压力的提高。未来研究应充分考虑氢气和烯烃等物质与烷烃类物质在分子结构上的差异, 深入研究爆炸链式反应的关键自由基和反应路径, 研制出针对氢气、乙烯等物质燃爆特性的抑制粉体, 实现对爆炸强度的高效削弱。

(3) 为提升抑制粉体的物理和化学抑制作用, 现有研究趋向于多组分抑制粉体的复配, 以达到协同增效的目的。然而, 现阶段研究呈现出通过排列组合进行材料复配的特点, 常见的作法是选取一种化学抑制作用较强的活性组分, 如 NaHCO_3 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 等, 将其负载至拥有较大比表面积和吸附能力的惰性组分上, 如蒙脱土、沸石等。上述做法会导致实验工作量的显著增加和人力物力的消耗。未来应加强基于化学反应动力学模型的数值计算研究, 将抑制材料分子模型构建和反应过程的计算置于材料合成前,

用理论指导材料合成,并用实验验证理论的可靠性,以此避免抑制粉体研发的盲目性。

(4) 现有抑制粉体的研发大多为纵向对比,即通过与未添加抑制剂的空白燃爆实验进行对比,来验证新型粉体的抑制效果。未来研究应建立在横向对比的基础上,即将各种新型和成熟粉体进行性能对比,探究造成性能差异的关键因素,以减少研究的低效重复。此外,现阶段市面上存在已商业使用的超细 ABC、超细 BC 等高性能灭火剂,后续抑制粉体的研发应以这些灭火剂作为标杆,实现抑制性能的超越。

(5) 现有研究中对于抑制粉剂性能的测试方法不统一,采用的测试设备(20 L 爆炸球、爆炸釜、竖直管道、水平管道等)和测试参数(点火能量、喷粉压力等)各不相同,难以实现第(4)条总结中提到的横向对比。未来研究应对粉体性能测试进行规范化和标准化,即在相同的实验条件下测试各类粉体的抑制性能,并建立测试结果数据库,方便研究人员进行参考和对比。

(6) 现有研究大多关注对纯组分粉剂物理和化学抑制能力的提升,然而在粉体最终的量产过程中,还需考虑粉体的长期保存能力、流动性、抗吸湿性等特性。未来研究应增强对各类添加剂的研发和优化,以提升抑制粉体的综合性能。

参考文献:

- [1] 林森. KHCO_3 冷气溶胶的甲烷抑爆特性研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2021. DOI: [10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000085](https://doi.org/10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000085).
LIN S. Suppression characteristics of KHCO_3 cold aerosol on methane explosion [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2021. DOI: [10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000085](https://doi.org/10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000085).
- [2] 郑立刚, 王亚磊, 于水军, 等. NaHCO_3 抑制瓦斯爆炸火焰与压力的耦合分析 [J]. *化工学报*, 2018, 69(9): 4129–4136. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180433.
ZHENG L G, WANG Y L, YU S J, et al. Coupled relationship between flame and overpressure of gas explosion inhibited by NaHCO_3 [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(9): 4129–4136. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180433.
- [3] 王戈, 王斌, 何明国. 超细干粉灭火剂的研发应用进展 [J]. *消防技术与产品信息*, 2013(9): 75–77, 128.
- [4] IYA K S, WOLLOWITZ S, KASKAN W E. The mechanism of flame inhibition by sodium salts [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1975, 15(1): 329–336. DOI: 10.1016/S0082-0784(75)80308-0.
- [5] ZHENG L G, WANG Y L, YU S J, et al. The premixed methane/air explosion inhibited by sodium bicarbonate with different particle size distributions [J]. *Powder technology*, 2019, 354: 630–640. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.034.
- [6] 王信群, 王婷, 徐海顺, 等. BC 粉体抑爆剂改性及抑制甲烷/空气混合物爆炸 [J]. *化工学报*, 2015, 66(12): 5171–5178. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141869.
WANG X Q, WANG T, XU H S, et al. Modification of commercial BC dry chemical powder suppressant and experiments on suppression of methane-air explosion [J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(12): 5171–5178. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141869.
- [7] 付元鹏. 导管泄放过程中 NaHCO_3 粉体抑制瓦斯爆炸特性研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2021. DOI: [10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000200](https://doi.org/10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000200).
FU Y P. Study on the gas explosion suppressed by NaHCO_3 powder during ducted venting process [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2021. DOI: [10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000200](https://doi.org/10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000200).
- [8] 余明高, 付元鹏, 郑立刚, 等. 碳酸氢钠粉体对导管泄爆过程的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(9): 095403. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0437.
YU M G, FU Y P, ZHENG L G, et al. Effect of sodium bicarbonate powder on the process of ducted venting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(9): 095403. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0437.
- [9] LUO Z M, SU Y, CHEN X K, et al. Effect of BC powder on hydrogen/methane/air premixed gas deflagration [J]. *Fuel*, 2019, 257: 116095. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116095.
- [10] XU M T, ZHENG L G, WANG J, et al. Effect of hydrogen fraction and initial pressure on the inhibition of methane/hydrogen/air explosions by NaHCO_3 [J]. *Fuel*, 2024, 365: 131273. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131273.
- [11] JIA J Z, TIAN X Y, WANG F X. Study on the effect of KHCO_3 particle size and powder spraying pressure on the methane explosion suppression characteristics of pipe networks [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(36): 31974–31982. DOI: 10.1021/acsomega.

- 2c02945.
- [12] KUANG K Q, CHOW W K, NI X M, et al. Fire suppressing performance of superfine potassium bicarbonate powder [J]. *Fire and Materials*, 2011, 35(6): 353–366. DOI: 10.1002/fam.1058.
- [13] CAO X Y, BI M S, REN J J, et al. Experimental research on explosion suppression affected by ultrafine water mist containing different additives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368: 613–620. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.01.006.
- [14] WILLIAMS B A, FLEMING J W. Suppression mechanisms of alkali metal compounds [C]//Halon Options Technical Working Conference. Gaithersburg, 1999.
- [15] 田莉. 受限空间内氢气/甲烷/空气混合物爆炸特性及抑爆研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2019. DOI: 10.27819/d.cnki.gzgj.2019.000072.
- TIAN L. Study on characteristics and suppression of hydrogen/methane/air mixture explosion in enclosed space [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2019. DOI: 10.27819/d.cnki.gzgj.2019.000072.
- [16] MITANI T. A flame inhibition theory by inert dust and spray [J]. *Combustion and Flame*, 1981, 43: 243–253. DOI: 10.1016/0010-2180(81)90024-9.
- [17] CHELLIAH H K, WANIGARATHNE P C, LENTATI A M, et al. Effect of sodium bicarbonate particle size on the extinction condition of non-premixed counterflow flames [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 134(3): 261–272. DOI: 10.1016/S0010-2180(03)00092-0.
- [18] ROSSER W A, INAMI S H, WISE H. The effect of metal salts on premixed hydrocarbon-air flames [J]. *Combustion and Flame*, 1963, 7: 107–119. DOI: 10.1016/0010-2180(63)90168-8.
- [19] DOUNIA O, VERMOREL O, POINSOT T. Theoretical analysis and simulation of methane/air flame inhibition by sodium bicarbonate particles [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 193: 313–326. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.03.033.
- [20] FAN R J, JIANG Y, LI W, et al. Investigation of the physical and chemical effects of fire suppression powder NaHCO_3 addition on methane-air flames [J]. *Fuel*, 2019, 257: 116048. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116048.
- [21] 杨春丽, 刘艳, 胡玢, 等. 氮气和水蒸气对瓦斯爆炸基元反应的影响及抑爆机理分析 [J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 301–308. DOI: 10.11858/gywlb.2017.03.012.
- YANG C L, LIU Y, HU F, et al. Effect of nitrogen and water vapor on methane-air mixture explosion elementary reaction and suppression mechanism [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 301–308. DOI: 10.11858/gywlb.2017.03.012.
- [22] 王婷, 王信群, 吕岳, 等. 超细活性及惰性粉体对甲烷/空气预混物层流火焰传播的影响 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1720–1727. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1759.
- WANG T, WANG X Q, LV Y, et al. Interaction of ultrafine chemical active and inert powder with premixed laminar flame of methane-air mixtures [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1720–1727. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1759.
- [23] 况凯骞, 王亚果, 黄鑫, 等. 改性超细粉体灭火性能模拟实验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(2): 115–119. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2006.02.031.
- KUANG K Q, WANG Y G, HUANG X, et al. Experimental study on fire suppression effectiveness of superfine and surface treatment powder [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(2): 115–119. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2006.02.031.
- [24] 王雪燕. KHCO_3 复配抑爆剂抑制甲烷-空气爆炸特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.004091.
- WANG X Y. Investigation of methane-air explosion suppression by KHCO_3 composite powder inhibitor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.004091.
- [25] 罗振敏, 张江, 任军莹, 等. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体热分解产物在瓦斯爆炸中的作用 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1489–1495. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0982.
- LUO Z M, ZHANG J, REN J Y, et al. Role of thermal decomposition products of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ powder in gas explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1489–1495. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0982.
- [26] 戴晓静. 磷酸二氢盐抑爆剂的制备与抑爆作用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- DAI X J. Research on dihydric phosphate salt suppressant's preparation and effects on explosion [D]. Nanjin: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [27] 李睿德, 徐景德, 张延炜, 等. 喷尘压力对磷酸二氢铵分散状况及抑制甲烷爆炸影响实验研究 [J]. *华北科技学院学报*, 2024, 21(1): 87–96. DOI: 10.19956/j.cnki.ncist.2024.01.013.

- LI R D, XU J D, ZHANG Y W, et al. Experimental study on the effect of dust spraying pressure on the dispersion condition of ammonium dihydrogen phosphate and the suppression of methane explosion [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2024, 21(1): 87–96. DOI: 10.19956/j.cnki.ncist.2024.01.013.
- [28] 徐景德, 李睿德, 张延炜. 磷酸二氢铵对甲烷爆炸火焰结构影响的抑爆试验研究 [J]. *华北科技学院学报*, 2024, 21(2): 90–99. DOI: 10.19956/j.cnki.ncist.2024.02.013.
- XU J D, LI R D, ZHANG Y W. Experimental study on the effect of ammoniumdihydrogen phosphate on the flame structure of methane explosion based on detonation suppression [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2024, 21(2): 90–99. DOI: 10.19956/j.cnki.ncist.2024.02.013.
- [29] 文虎, 曹玮, 程方明, 等. 超细磷酸铵盐干粉抑制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. *煤矿安全*, 2011, 42(7): 1–3, 7. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2011.07.008.
- WEN H, CAO W, CHENG F M, et al. Experiment study on ultrafine ammonium phosphate dry powder to repress gas explosion [J]. *Safety in Coal Mines*, 2011, 42(7): 1–3, 7. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2011.07.008.
- [30] 文虎, 曹玮, 王开阔, 等. ABC 干粉抑制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(6): 9–12. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2011.06.002.
- WEN H, CAO W, WANG K K, et al. Experimental study on ABC dry powder to repress gas explosion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(6): 9–12. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2011.06.002.
- [31] 张宇明, 邹高万, 郜冶, 等. ABC 干粉对爆炸超压的抑制 [J]. *燃烧科学与技术*, 2012, 18(5): 456–460.
- ZHANG Y M, ZOU G W, GAO Y, et al. Explosion overpressure suppression by ABC powder [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(5): 456–460.
- [32] 张宇明, 邹高万, 郜冶, 等. ABC 干粉对爆燃火焰传播抑制实验 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(4): 449–453. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.201105039.
- ZHANG Y M, ZOU G W, GAO Y, et al. Experimental research on deflagration flame propagation suppression by ABC powder [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(4): 449–453. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.201105039.
- [33] ZHAO Q, CHEN X F, YANG M J, et al. Suppression characteristics and mechanisms of ABC powder on methane/coal dust compound deflagration [J]. *Fuel*, 2021, 298: 120831. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120831.
- [34] KORDYLEWSKI W, AMROGOWICZ J. Comparison of NaHCO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ effectiveness as dust explosion suppressants [J]. *Combustion and Flame*, 1992, 90(3/4): 344–345.
- [35] 罗振敏, 康凯, 任军莹. NH_3 对甲烷链式爆炸的微观作用机理 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(4): 876–883. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0922.
- LUO Z M, KANG K, REN J Y. Microscopic mechanism of NH_3 on chain of methane explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(4): 876–883. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0922.
- [36] WEI L J, SU M Q, WANG K, et al. Suppression effects of ABC powder on explosion characteristics of hybrid C_2H_4 /polyethylene dust [J]. *Fuel*, 2022, 310: 122159. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122159.
- [37] LI M H, XU J C, LI Q, et al. Explosion mitigation of methane-air mixture in combined application of inert gas and ABC dry powders in a closed compartment [J]. *Process Safety Progress*, 2020, 39(2): e12101. DOI: 10.1002/prs.12101.
- [38] 覃欣欣. ABC 抑爆粉剂对管道内瓦斯爆炸传播抑制的实验研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2016.
- TAN X X. The experimental study on the inhibition of ABC powder on gas explosion sprea in pipelines [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2016.
- [39] 黄子超, 司荣军, 薛少谦. 抑爆粉剂浓度及粒度对瓦斯爆炸抑制效果的影响 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(4): 89–94. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2018.04.014.
- HUANG Z C, SI R J, XUE S Q. Influence of concentration and granularity of powder explosion suppressant on suppression effect of gas explosion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(4): 89–94. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2018.04.014.
- [40] 李成兵. $\text{N}_2/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 抑制甲烷爆炸化学动力学机理分析 [J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(8): 88–92. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2010.08.014.
- LI C B. Chemical kinetics mechanism analysis of $\text{N}_2/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ suppressing methane explosion [J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(8): 88–92. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2010.08.014.
- [41] YIN H P, DAI H M, LIANG G Q. Inhibition evaluation of magnesium hydroxide, aluminum hydroxide, and hydrotalcite on

- the flame propagation of coal dust [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 157: 443–457. DOI: 10.1016/j.psep.2021.11.048.
- [42] 文虎, 王秋红, 罗振敏, 等. 超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体抑制甲烷爆炸的实验研究 [J]. *西安科技大学学报*, 2009, 29(4): 388–390, 395. DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2009.04.012.
- WEN H, WANG Q H, LUO Z M, et al. Experiment on $\text{Al}(\text{OH})_3$ ultrafine powder suppressing methane explosion [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2009, 29(4): 388–390, 395. DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2009.04.012.
- [43] 王秋红. 超细金属氢氧化物粉体抑制瓦斯爆炸实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- WANG Q H. Experimental research on suppressing gas explosion by ultrafine metal hydroxide powders [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.
- [44] MA X S, MENG X B, LI Z Y, et al. Study of the influence of melamine polyphosphate and aluminum hydroxide on the flame propagation and explosion overpressure of aluminum magnesium alloy dust [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 68: 104291. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104291.
- [45] 苏洋. 氢气/甲烷/空气预混气体爆燃特性及抑制规律研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2018.
- SU Y. Study on the deflagration characteristics and suppression of hydrogen/methane/air premixed gas [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2018.
- [46] 白洁, 薛宝霞, 杨雅茹, 等. 壳聚糖/聚磷酸铵膨胀阻燃 PP 的阻燃及抑烟性能 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(7): 119–123. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2017.07.024.
- BAI J, XUE B X, YANG Y R, et al. Flame retardancy and smoke suppression of intumescent flame retardant PP with chitosan/ammonium phosphate [J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(7): 119–123. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2017.07.024.
- [47] 陈旬, 袁利萍, 胡云楚, 等. 聚磷酸铵和改性海泡石处理木材的阻燃抑烟作用 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(10): 147–152. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2013.10.005.
- CHEN X, YUAN L P, HU Y C, et al. Effects of treating woods with modified sepiolite and ammonium polyphosphate on their flame retardant and smoke suppression properties [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(10): 147–152. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2013.10.005.
- [48] 廖家浩. 改性聚磷酸铵在环氧树脂中的阻燃抑烟性能及机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2022. DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2022.001103.
- LIAO J H. Research on flame retardant and smoke suppression properties and mechanism of modified ammonium polyphosphate in epoxy resin [D]. Changsha: Central South University, 2022. DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2022.001103.
- [49] ZHAO Q, CHEN X F, LI Y, et al. Suppression mechanisms of ammonium polyphosphate on methane/coal dust explosion: based on flame characteristics, thermal pyrolysis and explosion residues [J]. *Fuel*, 2022, 326: 125014. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125014.
- [50] JIANG B Y, DING D W, SU M Q, et al. Experimental study on the explosion suppression characteristics of polyethylene dust by ammonium polyphosphate [J]. *Powder Technology*, 2024, 437: 119491. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119491.
- [51] WU Y, MENG X B, SHI L, et al. Experimental study on the suppression of coal dust explosion by ammonium polyphosphate modified aerogel based on explosive solid/gas products [J]. *Advanced Powder Technology*, 2024, 35(3): 104364. DOI: 10.1016/j.appt.2024.104364.
- [52] 胡云楚. 硼酸锌和聚磷酸铵在木材阻燃中的成炭作用和抑烟作用 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2006.
- HU Y C. Char forming and smoke suppression function of zinc borate and ammonium polyphosphate on wood during combustion [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
- [53] SUN Y R, YUAN B H, CHEN X F, et al. Suppression of methane/air explosion by kaolinite-based multi-component inhibitor [J]. *Powder Technology*, 2019, 343: 279–286. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.026.
- [54] 员亚龙, 陈先锋, 袁必和, 等. 聚磷酸铵对糖粉火焰传播特性的影响研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(11): 71–76. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.11.012.
- YUAN Y L, CHEN X F, YUAN B H, et al. Effects of ammonium polyphosphate on flame propagation characteristics of sugar dust [J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(11): 71–76. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.11.012.
- [55] 李璐. 聚磷酸铵抑制 PMMA 粉尘爆炸特性及机理研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2022. DOI: 10.27116/d.cnki.gjzgc.2022.000275.

- LI L. Study on characteristics and mechanism of APP inhibiting PMMA dust explosion [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2022. DOI: [10.27116/d.cnki.gjzgc.2022.000275](https://doi.org/10.27116/d.cnki.gjzgc.2022.000275).
- [56] 李珍宝, 李超, 王虎, 等. MPP 抑制铝镁合金粉尘爆炸微观机理研究 [J]. *化工学报*, 2023, 74(8): 3608–3614. DOI: [10.11949/0438-1157.20230598](https://doi.org/10.11949/0438-1157.20230598).
- LI Z B, LI C, WANG H, et al. The microscopic mechanism on MPP inhibiting explosion of Al-Mg alloy powder [J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(8): 3608–3614. DOI: [10.11949/0438-1157.20230598](https://doi.org/10.11949/0438-1157.20230598).
- [57] 王秋红, 申中一, 王清峰. 抑制铝粉尘云爆炸的粉体材料效能对比分析 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2020, 51(4): 922–930. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2020.04.007](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2020.04.007).
- WANG Q H, SHEN Z Y, WANG Q F. Comparative analysis of the effectiveness of powder materials on suppressing aluminum dust cloud explosion [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(4): 922–930. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2020.04.007](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2020.04.007).
- [58] 杨振欣. 固态抑制剂对煤尘爆炸的抑制特性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023. DOI: [10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.000193](https://doi.org/10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.000193).
- YANG Z X. Study on the suppression characteristics of solid state inhibitorson coal dust explosion [D]. Taiyuan: North University of China, 2023. DOI: [10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.000193](https://doi.org/10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.000193).
- [59] 姜海鹏. 固态抑爆剂抑制铝粉尘爆炸机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019. DOI: [10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003574](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003574).
- JIANG H P. Suppression mechanism of Al dust explosion by solid suppressants [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. DOI: [10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003574](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003574).
- [60] 王秋红, 闵锐, 王清峰. 3 种阻燃粉体抑制铝粉云爆炸强度的效果和机理 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48(8): 72–81,90. DOI: [10.12141/j.issn.1000-565X.190344](https://doi.org/10.12141/j.issn.1000-565X.190344).
- WANG Q H, MIN R, WANG Q F. Inhibition effect and mechanism of three kinds of flame retardant powders on the explosion intensity of zirconium dust clouds [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(8): 72–81,90. DOI: [10.12141/j.issn.1000-565X.190344](https://doi.org/10.12141/j.issn.1000-565X.190344).
- [61] 张术琳. 气固两相抑爆剂抑制铝粉尘爆炸协同规律及机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021. DOI: [10.26991/d.cnki.gdllu.2021.004721](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2021.004721).
- ZHANG S L. Study on the synergistic inhibition law and mechanism of gas-solid inhibitors on aluminum dust explosions [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. DOI: [10.26991/d.cnki.gdllu.2021.004721](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2021.004721).
- [62] 张术琳, 文拙, 鲁义, 等. 煤自燃环境磷氮系抑爆剂抑制多元可燃气体爆炸机制研究 [J]. *消防科学与技术*, 2024, 43(3): 398–404. DOI: [10.3969/j.issn.1009-0029.2024.03.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0029.2024.03.021).
- ZHANG S L, WEN Z, LU Y, et al. Study on the mechanism of multiple combustible gas explosion suppression by phosphorus-nitrogen series explosion suppressant in coal spontaneous combustion environment [J]. *Fire Science and Technology*, 2024, 43(3): 398–404. DOI: [10.3969/j.issn.1009-0029.2024.03.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0029.2024.03.021).
- [63] 余明高, 王天政, 游浩. 粉体材料热特性对瓦斯抑爆效果影响的研究 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(5): 830–835. DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.2012.05.025](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2012.05.025).
- YU M G, WANG T Z, YOU H. Study on gas explosion suppression influence of thermal properties of powder [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(5): 830–835. DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.2012.05.025](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2012.05.025).
- [64] 王天政. 超细粉体抑制管道瓦斯爆炸实验研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- WANG T Z. Experimental study on the gas explosion suppression by ultrafine powder in tube [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.
- [65] 李孝斌, 张瑞杰, 崔沂巍, 等. 尿素抑制甲烷爆炸过程中爆炸压力与自由基变化耦合分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(3): 10–20. DOI: [10.11883/bzycj-2019-0090](https://doi.org/10.11883/bzycj-2019-0090).
- LI X B, ZHANG R J, CUI L W, et al. Coupling analysis of explosion pressure and free radical change during methane explosion inhibited by urea [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(3): 10–20. DOI: [10.11883/bzycj-2019-0090](https://doi.org/10.11883/bzycj-2019-0090).
- [66] 李孝斌, 张瑞杰, 孙婧雯, 等. 甲烷爆炸中尿素粉体浓度对典型自由基影响研究 [J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(4): 1093–1100. DOI: [10.13637/j.issn.1009-6094.2021.2116](https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2021.2116).
- LI X B, ZHANG R J, SUN J W, et al. Experiment of typical free radical change during urea inhibition of methane explosion [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(4): 1093–1100. DOI: [10.13637/j.issn.1009-6094.2021.2116](https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2021.2116).
- [67] 伊宏伟. 硅酸盐矿物粉体的瓦斯抑爆特性研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2018.
- YI H W. Suppression characteristics of silicate mineral powders on methane explosion [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan

- Polytechnic University, 2018.
- [68] 王枫潇. 固态粉体对管网甲烷爆炸的抑制性能及抑爆机理研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023. DOI: [10.27210/d.cnki.glnju.2023.000017](https://doi.org/10.27210/d.cnki.glnju.2023.000017).
- WANG F X. Research on the performance of solid powder to suppress methane explosion and mechanism in pipeline network [D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2023. DOI: [10.27210/d.cnki.glnju.2023.000017](https://doi.org/10.27210/d.cnki.glnju.2023.000017).
- [69] 朱益萍, 王学刚, 聂世勇, 等. 黏土矿物材料在含铀废水处理中的应用研究进展 [J]. *水处理技术*, 2019, 45(7): 13–17, 29. DOI: [10.16796/j.cnki.1000-3770.2019.07.003](https://doi.org/10.16796/j.cnki.1000-3770.2019.07.003).
- ZHU Y P, WANG X G, NIE S Y, et al. Research advances in the application of clay mineral materials on uranium-containing wastewater treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(7): 13–17, 29. DOI: [10.16796/j.cnki.1000-3770.2019.07.003](https://doi.org/10.16796/j.cnki.1000-3770.2019.07.003).
- [70] 刘明泉, 金盈, 李硕, 等. 改性高岭土的制备及其应用 [J]. *中国陶瓷*, 2021, 57(4): 68–72. DOI: [10.16521/j.cnki.issn.1001-9642.2021.04.011](https://doi.org/10.16521/j.cnki.issn.1001-9642.2021.04.011).
- LIU M Q, JIN Y, LI S, et al. Preparation and application of modified kaolin clay [J]. *China Ceramics*, 2021, 57(4): 68–72. DOI: [10.16521/j.cnki.issn.1001-9642.2021.04.011](https://doi.org/10.16521/j.cnki.issn.1001-9642.2021.04.011).
- [71] 宋理想. 插层改性高岭土在聚丙烯/膨胀阻燃体系的阻燃应用及机理分析 [D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- SONG L X. The effect of intercalated kaolinite on the Flame retardancy of polypropylene and mechanism research [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [72] 余明高, 贺涛, 李海涛, 等. 改性高岭土抑爆剂对瓦斯煤尘复合爆炸压力的影响 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 348–359. DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1731](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1731).
- YU M G, HE T, LI H T, et al. Influence of modified kaoline inhibitor on the explosion suppression pressure of the methane-coal dust mixture [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 348–359. DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1731](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1731).
- [73] 苏洋, 罗振敏, 王涛. CO₂/海泡石抑爆剂对氢气/甲烷爆炸特性参数的影响 [J]. *化工进展*, 2022, 41(11): 5731–5736. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0044](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0044).
- SU Y, LUO Z M, WANG T. Effect of CO₂/sepiolite explosion suppressant on hydrogen/methane deflagration characteristic parameters [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(11): 5731–5736. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0044](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0044).
- [74] 倪小敏, 况凯骞, 杨冬雷, 等. 载铁改性沸石粉体抑制甲烷/空气扩散火焰试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(1): 53–57. DOI: [10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2012.01.008](https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2012.01.008).
- NI X M, KUANG K Q, YANG D L, et al. Experimental study on the suppression of methane/air diffusion flame by iron-modified zeolite powders [J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(1): 53–57. DOI: [10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2012.01.008](https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2012.01.008).
- [75] 王燕, 杨帅帅, 张国涛, 等. 改性沸石抑制乙烯爆炸性能及机理研究 [J]. *化工学报*, 2023, 74(12): 5048–5060. DOI: [10.11949/0438-1157.20231063](https://doi.org/10.11949/0438-1157.20231063).
- WANG Y, YANG S S, ZHANG G T, et al. Explosion suppression characteristics and mechanism of ethylene by modified zeolite [J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(12): 5048–5060. DOI: [10.11949/0438-1157.20231063](https://doi.org/10.11949/0438-1157.20231063).
- [76] 倪小敏, 杨冬雷, 况凯骞, 等. 溴氟丙烯/13X 沸石复合粉体抑制汽油火的试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(5): 53–58. DOI: [10.3969/j.issn.1003-3033.2011.05.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3033.2011.05.009).
- NI X M, YANG D L, KUANG K Q, et al. Experimental study on performance of bromotrifluoropropene/zeolite 13X composite powders in suppressing gasoline fires [J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(5): 53–58. DOI: [10.3969/j.issn.1003-3033.2011.05.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3033.2011.05.009).
- [77] ZHANG J, MEGARIDIS C M. Soot suppression by ferrocene in laminar ethylene/air nonpremixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 1996, 105(4): 528–540. DOI: [10.1016/0010-2180\(95\)00209-X](https://doi.org/10.1016/0010-2180(95)00209-X).
- [78] TIAN K, LI Z S, STAUBE S, et al. Influence of ferrocene addition to a laminar premixed propene flame: laser diagnostics, mass spectrometry and numerical simulations [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 445–452. DOI: [10.1016/j.proci.2008.05.056](https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.05.056).
- [79] 余明高, 郝强, 段玉龙, 等. 二茂铁灭火实验平台研制与灭火有效性研究 [J]. *火灾科学*, 2007, 16(2): 86–90. DOI: [10.3969/j.issn.1004-5309.2007.02.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-5309.2007.02.004).
- YU M G, HAO Q, DUAN Y L, et al. Development of a ferrocene fire suppression experimental platform with examination of

- its fire suppression effectiveness [J]. *Fire Safety Science*, 2007, 16(2): 86–90. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5309.2007.02.004.
- [80] 郑凯. 二茂铁抑制管道瓦斯爆炸实验研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2014.
ZHENG K. Experiment study on gas explosion suppression based on ferrocene in ducts [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2014.
- [81] 蒲广梅. ABC 干粉/硅藻土抑制瓦斯爆炸实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
PU G M. Experimental study on inhibiting gas explosion using ABC dry powder/diatomite powder [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [82] 程方明, 邓军, 罗振敏, 等. 硅藻土粉体抑制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(4): 604–607. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3363.2010.04.031.
CHENG F M, DENG J, LUO Z M, et al. Experimental study on inhibiting gas explosion using diatomite powder [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2010, 27(4): 604–607. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3363.2010.04.031.
- [83] 程方明. 超细粉体抑制甲烷-空气预混气爆炸实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
CHENG F M. Experimental research on suppressing premixed methane-air explosion by ultrafine particles [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [84] 郭秀瑞, 李宝智. 超细精制硅藻土作为载体的应用研究 [J]. *非金属矿*, 2002, 25(2): 29, 10. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8098.2002.02.010.
GUO X R, LI B Z. Research on application of ultrafine purified diatomite in carrier [J]. *Non-Metallic Mines*, 2002, 25(2): 29, 10. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8098.2002.02.010.
- [85] 何文浩, 郝朝瑜, 张亚超, 等. 硅藻土抑制瓦斯爆炸的微观机理分析 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3695–3703. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.1457.
HE W H, HAO C Y, ZHANG Y C, et al. Microscopic mechanism analysis of inhibition on methane explosion by diatomite [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3695–3703. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.1457.
- [86] 余明高, 孔杰, 王燕, 等. 改性赤泥粉体抑制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(7): 1289–1295. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0847.
YU M G, KONG J, WANG Y, et al. Experimental research on gas explosion suppression by modified red mud [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(7): 1289–1295. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0847.
- [87] 李建伟. 烧结法赤泥脱碱及碱回收工艺研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
LI J W. The research on technology of red mud dealkalization and alkali recovery [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [88] 孔杰. 赤泥基复合粉体抑爆材料制备及其抑爆性能实验研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2014.
KONG J. Experimental study on preparing red mud based composite powder and its explosion suppression performance [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2014.
- [89] 屈丽娜. K 型、S 型气溶胶抑制瓦斯爆炸实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
QU L N. Experimental research on suppressing gas explosion by K and S-type aerosol [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [90] 周文英, 任文娥, 左晶. 冷气溶胶灭火剂研究进展 [J]. *消防技术与产品信息*, 2010(11): 41–46. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2010.11.015.
ZHOU W Y, REN W E, ZUO J. Research progress in the cold aerosol fire extinguishing agent [J]. *Fire Technique and Products Information*, 2010(11): 41–46. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2010.11.015.
- [91] 任常兴, 张玉贤, 王婕, 等. 冷气溶胶油气环境抑爆效能研究 [J]. *消防技术与产品信息*, 2018, 31(11): 57–60. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2018.11.016.
REN C X, ZHANG Y X, WANG J, et al. Study on Explosion suppression effectiveness of cold aerosol in oil gas environment [J]. *Fire Technique and Products Information*, 2018, 31(11): 57–60. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2018.11.016.
- [92] 任常兴, 李晋, 张欣, 等. 超细冷气溶胶抑制油气预混爆炸实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(10): 28–31.
REN C X, LI J, ZHANG X, et al. Experimental research on suppressing premixed oil gas explosion by ultra-fine cold aerosol [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2012, 8(10): 28–31.
- [93] REN C X, SUN X T, ZHANG X, et al. Research on suppressing premixed fuel-air explosion by ultra-fine cold aerosol [J].

- Procedia Engineering*, 2014, 84: 340–346. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.442.
- [94] 黄超, 李继红. 钇稳定氧化锆气溶胶阻爆效率研究 [J]. *消防科学与技术*, 2013, 32(8): 897–899, 903. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2013.08.025.
HUANG C, LI J H. Study on the explosion retardant property of $ZrO_2(Y_2O_3)$ nanopowder aerosol [J]. *Fire Science and Technology*, 2013, 32(8): 897–899, 903. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2013.08.025.
- [95] KRASNYANSKY M. Prevention and suppression of explosions in gas-air and dust-air mixtures using powder aerosol-inhibitor [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(6): 729–735. DOI: 10.1016/j.jlp.2006.05.004.
- [96] 蒋新生, 杜扬, 王冬, 等. 基于超细冷气溶胶的油气爆炸抑爆剂研究 [J]. *后勤工程学院学报*, 2010, 26(5): 17–21, 41. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2010.05.004.
JIANG X S, DU Y, WANG D, et al. Research of fuel-air explosion suppressant based on ultra-fine cold aerosol [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2010, 26(5): 17–21, 41. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2010.05.004.
- [97] 王燕, 林森, 李忠, 等. 惰性气体对 $KHCO_3$ 冷气溶胶甲烷抑爆性能的影响研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(2): 145–152. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.02.018.
WANG Y, LIN S, LI Z, et al. Research on synergistic effect of inert gas on methane explosion suppression performance of $KHCO_3$ cold aerosol [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 145–152. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.02.018.
- [98] 王燕, 林森, 李忠, 等. 喷粉压力对 $KHCO_3$ 冷气溶胶甲烷抑爆效果影响研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(7): 70–75. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.07.010.
WANG Y, LIN S, LI Z, et al. Influence of dispersion pressure on methane explosion suppression effect of $KHCO_3$ cold aerosol [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(7): 70–75. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.07.010.
- [99] 余明高, 王雪燕, 郑凯, 等. 催化型复合粉体抑爆剂抑制瓦斯爆炸压力实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3212–3220. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1096.
YU M G, WANG X Y, ZHENG K, et al. Experimental investigation of gas explosion suppression by catalytic composite powder inhibitor [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3212–3220. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1096.
- [100] YU M G, WANG X Y, ZHENG K, et al. Investigation of methane/air explosion suppression by modified montmorillonite inhibitor [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 144: 337–348. DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.050.
- [101] 王燕, 程义伸, 曹建亮, 等. 核-壳型 $KHCO_3$ /赤泥复合粉体的甲烷抑爆特性 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 653–658. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0434.
WANG Y, CHENG Y S, CAO J L, et al. Suppression characteristics of $KHCO_3$ /red-mud composite powders with core-shell structure on methane explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 653–658. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0434.
- [102] WANG Y, CHENG Y S, YU M G, et al. Methane explosion suppression characteristics based on the $NaHCO_3$ /red-mud composite powders with core-shell structure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 335: 84–91. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.031.
- [103] 程义伸. 核-壳型赤泥复合粉体的瓦斯抑爆特性研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2017.
CHENG Y S. Suppression characteristics of red-mud based composite powders with core-shell structure on methane explosion [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2017.
- [104] ZHANG Y S, WU G G, CAI L, et al. Study on suppression of coal dust explosion by superfine $NaHCO_3$ /shell powder composite suppressant [J]. *Powder Technology*, 2021, 394: 35–43. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.037.
- [105] YANG K, CHEN K F, JI H, et al. Experimental study on the inhibition of methane/air explosion by modified attapulgite powder [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 72: 104574. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104574.
- [106] LIU A H, LU X E, ZHOU X Y, et al. Experimental investigation on suppression of methane explosion using $KHCO_3$ /zeolite composite powder [J]. *Powder Technology*, 2023, 415: 118157. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118157.
- [107] NI X M, KUANG K Q, YANG D L, et al. A new type of fire suppressant powder of $NaHCO_3$ /zeolite nanocomposites with core-shell structure [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(7): 968–975. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.06.004.
- [108] WANG Y, FENG H, ZHANG Y M, et al. Suppression effects of hydroxy acid modified montmorillonite powders on methane explosions [J]. *Energies*, 2019, 12(21): 4068. DOI: 10.3390/en12214068.
- [109] WANG Y, LIN S, FENG H, et al. Suppression of different functional group modified powders on 9.5% CH_4 -air explosion and molecular simulation mechanism [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 69: 104344. DOI:

- 10.1016/j.jlp.2020.104344.
- [110] 袁必和, 陶红吉, 孙亚如, 等. 多孔矿物-聚磷酸铵对甲烷爆炸的协同抑制研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(3): 41–46. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.03.006.
- YUAN B H, TAO H J, SUN Y R, et al. Study on synergistic suppression of methane explosion by porous mineral materials-ammonium polyphosphate composite powder [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(3): 41–46. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.03.006.
- [111] 贺涛. 高岭土改性/复配抑爆剂抑制瓦斯煤尘复合爆炸特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.001911.
- HE T. Investigation of gas and coal dust explosion suppression by Kaolin-based modified or composite powder inhibitor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.001911.
- [112] ZHANG Y M, WANG Y, MENG X Q, et al. The suppression characteristics of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ /red mud composite powders on methane explosion [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1433. DOI: 10.3390/app8091433.
- [113] WANG M C, ZHOU Z J, LIANG Z L, et al. The preparation and fire extinguishing mechanism research of a novel high-efficiency KHCO_3 @HM dry powder [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 107817. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107817.
- [114] WANG Z L, GUO X X, LIU J N, et al. Experimental study on the inhibition of hydrogen deflagration by flame-retardant compounded ultrafine dry powder fire extinguishing media containing zinc hydroxystannate [J]. *Renewable Energy*, 2024, 228: 120644. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120644.
- [115] DAI H M, LIANG G Q, YIN H P, et al. Experimental investigation on the inhibition of coal dust explosion by the composite inhibitor of carbamide and zeolite [J]. *Fuel*, 2022, 308: 121981. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121981.
- [116] WANG L C, LIANG Y T, HU Y, et al. Synergistic suppression effects of flame retardant, porous minerals and nitrogen on premixed methane/air explosion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 67: 104263. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104263.
- [117] 左前明, 程卫民, 邹冠贵, 等. 协同增效原理在煤尘抑爆剂中的应用实验 [J]. *重庆大学学报 (自然科学版)*, 2012, 35(1): 105–109, 116. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2012.01.020.
- ZUO Q M, CHENG W M, ZOU G G, et al. Applied experiments on coal dust inhibitor based on the theory of synergistic effect [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2012, 35(1): 105–109, 116. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2012.01.020.
- [118] 汪凤祺, 汪泉, 李成孝, 等. 干水材料特点及其应用前景 [J]. *煤矿爆破*, 2021, 39(2): 29–34. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3970.2021.02.008.
- WANG F Q, WANG Q, LI C X, et al. Features and application prospect of dry water materials [J]. *Coal Mine Blasting*, 2021, 39(2): 29–34. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3970.2021.02.008.
- [119] 高健强, 贺拥军, 杨惠, 等. 干水及其在灭火材料中的应用研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2021, 49(5): 43–47. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.05.010.
- GAO J Q, HE Y J, YANG H, et al. Dry water—a new type of green and efficient fire extinguishing material [J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(5): 43–47. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.05.010.
- [120] ZHANG T W, ZHANG S S, LIU H, et al. Experimental research on combustible gas/air explosion inhibition by dry water [J]. *International Journal of Hydrogen energy*, 2023, 48(93): 36605–36620. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.053.
- [121] 卞建峰, 贺拥军, 牟国栋. 一种反相泡沫灭火材料的制备及性能研究 [J]. *武警学院学报*, 2015, 31(4): 41–44. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2077.2015.04.009.
- BIAN J F, HE Y J, MOU G D. A study on the preparation and performance of a reversed-phase foam fire suppressant [J]. *Journal of Chinese People's Armed Police Force Academy*, 2015, 31(4): 41–44. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2077.2015.04.009.
- [122] 柴国强. 含金属钠盐干水灭火材料的制备及其灭火有效性和机理研究 [D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2022. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2022.002757.
- CHAI G Q. Study on preparation of dry water fire extinguishing materials containing alkali metal sodium salt and its effectiveness and mechanism [D]. Xuzhou, Jiangsu, China: China University of Mining and Technology, 2022. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2022.002757.
- [123] HAN Z Y, ZHANG Y P, DU Z M, et al. New-type gel dry-water extinguishants and its effectiveness [J]. *Journal of Cleaner*

- [Production](#), 2017, 166: 590–600. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.005.
- [124] 陈先锋, 樊傲, 袁必和, 等. 干水材料对瓦斯爆燃抑制的实验研究 [J]. [爆炸与冲击](#), 2019, 39(11): 120–130. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0236.
- CHEN X F, FAN A, YUAN B H, et al. Experimental study on suppression of gas deflagration by dry water materials [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2019, 39(11): 120–130. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0236.
- [125] WANG Q H, MA C, DENG J, et al. Gas explosion suppression by ammonium dihydrogen phosphate-modified dry water powder [J]. [Powder Technology](#), 2023, 416: 118228. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118228.
- [126] WANG Q H, PENG B, LUO Z M, et al. Gas explosion suppression performance of modified gel-type dry waters [J]. [Powder Technology](#), 2023, 420: 118378. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118378.
- [127] ZENG H, QIU D Y, LI K Y, et al. A novel gel dry water: preparation and application in methane-air explosion [J]. [Process Safety and Environmental Protection](#), 2024, 186: 134–150. DOI: 10.1016/j.psep.2024.03.076.
- [128] GUO X X, LIU J N, XUE S J, et al. Experimental study on suppression of hydrogen jet flame by solid-liquid two-phase composite powders containing core-shell structure [J]. [Fuel](#), 2024, 371: 131900. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131900.
- [129] 李刚. 最佳阻塞比下复合粉体抑制瓦斯爆炸的尺度效应研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2019. DOI: [10.27116/d.cnki.gjzgc.2019.000305](#).
- LI G. Experimental study on scale effect of gas explosion suppressed by composite powder under optimal blockage ratio [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2019. DOI: [10.27116/d.cnki.gjzgc.2019.000305](#).
- [130] WANG Q H, JIANG X X, DENG J, et al. Analysis of the effectiveness of $Mg(OH)_2/NH_4H_2PO_4$ composite dry powder in suppressing methane explosion [J]. [Powder Technology](#), 2023, 417: 118255. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118255.
- [131] JI W T, YANG J J, HE J, et al. Preparation and characterization of flower-like Mg-Al hydrotalcite powder for suppressing methane explosion [J]. [Journal of Loss Prevention in the Process Industries](#), 2022, 80: 104858. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104858.
- [132] LI Y, CHEN X F, YUAN B H, et al. Synthesis of a novel prolonged action inhibitor with lotus leaf-like appearance and its suppression on methane/hydrogen/air explosion [J]. [Fuel](#), 2022, 329: 125401. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125401.

(责任编辑 张凌云)